

Trabajo Fin de Grado

Cálculo del consumo energético de un tranvía
y estudio de métodos de carga que permitan
la eliminación de la catenaria

Autor

Carlos Torres Sebastián

Director

José Francisco Sanz Osorio

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2015



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./D^a. CARLOS TORRES SEBASTIÁN

con nº de DNI 73010376-G en aplicación de lo dispuesto en el art.

14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster)
Grado _____, (Título del Trabajo)

CÁLCULO DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE UN TRANVÍA Y ESTUDIO DE
MÉTODOS DE CARGA QUE PERMITAN LA ELIMINACIÓN DE LA CATENARIA

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 20 de Noviembre de 2015

Fdo: Carlos Torres Sebastián

Resumen

Cálculo del consumo energético de un tranvía y estudio de métodos de carga que permitan la eliminación de la catenaria

En la actualidad, muchas ciudades tienen por lo menos una línea de tranvía que la atraviesa. Éstos van alimentados generalmente a través de una catenaria que les suministra la electricidad necesaria. Estos cables colgados de postes a lo largo de toda la ciudad no resultan nada atractivos. El presente proyecto, tiene como objetivo calcular cual es el consumo del tranvía de Zaragoza y estudiar diferentes métodos de carga de baterías por inducción, que sean capaces de aportar toda la energía que necesite y de esta manera, poder eliminar la catenaria.

Para ello, se ha estudiado e investigado el funcionamiento de un tranvía, su arquitectura y las fuerzas de resistencia que ha de vencer para poder desplazarse.

Después se ha calculado cual es la velocidad del tranvía en cada momento. Esto se ha realizado utilizando la aplicación móvil "*My Tracks*", la cual a través del GPS del teléfono, al desplazarse, calcula la distancia recorrida y la velocidad. Realizando varios trayectos completos de la línea y analizando todos los datos obtenidos, se ha calculado la velocidad del tranvía a lo largo de todo el recorrido.

Posteriormente, se ha creado un modelo en el programa Matlab/Simulink, introduciéndole las fórmulas de las fuerzas de resistencia y los datos referentes al tranvía (velocidad, peso, dimensiones...) para calcular el consumo energético teórico, comparando los resultados con otros estudios similares.

Con ese mismo modelo, se han estudiado diferentes situaciones de carga de baterías, calculando cual debería ser la capacidad de estas si se quiere que sean la única fuente de alimentación, así como el tiempo necesario para recargarlas una vez su estado de carga haya alcanzado un mínimo definido para no dañarlas.

Índice de contenido

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	OBJETIVOS	3
3.	ANÁLISIS HISTÓRICO	4
4.	CONSUMO	6
4.1.	FUNCIONAMIENTO DE UN TRANVÍA.....	6
4.2.	MÉTODO DE CÁLCULO DE CONSUMO DE UN TRANVÍA.....	7
4.3.	TOMA DE DATOS DEL TRANVÍA DE ZARAGOZA	9
4.4.	Cálculo de la velocidad	12
4.5.	Creación de un modelo de cálculo	14
4.6.	Cálculo del consumo	17
4.7.	Comparación de resultados	24
4.8.	Conclusiones	27
5.	CARGA DE BATERÍAS	29
5.1.	Funcionamiento y estado del arte de la carga por inducción.....	30
5.2.	Estado del arte de sistemas de almacenamiento	35
5.3.	Modelo de cálculo	41
5.4.	Cálculo de baterías.....	42
6.	Conclusiones	57
7.	Líneas futuras	58
8.	ANEXOS	59
8.1.	ANEXO I. Cuadríptico del tranvía de Zaragoza	59
8.2.	ANEXO II. Curvas de velocidad y altura	67
8.3.	ANEXO III. Lista de variables.....	69
8.4.	ANEXO IV. Caga de baterías a distintas potencias	71
9.	Referencias bibliográficas	88

Índice de Ilustraciones

<i>Ilustración 1. Tranvía de Swansea</i>	<i>4</i>
<i>Ilustración 2. Tranvía de vapor en Italia</i>	<i>4</i>
<i>Ilustración 3. Cable car en San Francisco</i>	<i>4</i>
<i>Ilustración 4. Sistema con tercer raíl.....</i>	<i>5</i>
<i>Ilustración 5. Translohr en Clermont-Ferrad</i>	<i>5</i>
<i>Ilustración 6. Tranvía de Zaragoza circulando sin catenaria</i>	<i>9</i>
<i>Ilustración 7. Mapa recorrido del tranvía</i>	<i>10</i>

Índice de figuras

<i>Figura 1. Esquema de un tranvía</i>	<i>6</i>
<i>Figura 2. Consumos y pérdidas de un tranvía</i>	<i>7</i>
<i>Figura 3. Modelo cálculo de consumo</i>	<i>15</i>
<i>Figura 4. Modelo dinámico</i>	<i>16</i>
<i>Figura 5. Transmisión de potencia sin cable</i>	<i>30</i>
<i>Figura 6. Sistemas de captura del flujo magnético.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 7. Flujo capturado por cada sistema.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 8. Esquema carga inductiva de un tranvía.....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 9. Esquema sistema carga inductiva</i>	<i>32</i>
<i>Figura 10. Espira primaria.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 11. Espira secundaria.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 12. Topologías sistema carga inductiva.....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 13. Comportamiento frente a desalineamiento</i>	<i>34</i>
<i>Figura 14. Topología Serie-Paralelo-Serie</i>	<i>34</i>
<i>Figura 15. Características de diferentes baterías</i>	<i>36</i>
<i>Figura 16. Esquema de un ultracondensador</i>	<i>39</i>
<i>Figura 17. Configuración UC/Batería en cascada pasiva</i>	<i>39</i>
<i>Figura 18. Configuración UC/Batería en cascada activa</i>	<i>40</i>
<i>Figura 19. Configuración UC/Batería en paralelo.....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 20. Modelo cálculo de baterías.....</i>	<i>42</i>

Índice de gráficos

<i>Gráfico 1. Curva de velocidad inicial</i>	<i>12</i>
<i>Gráfico 2. Curva de velocidad sentido Academia-Valdespartera.....</i>	<i>12</i>
<i>Gráfico 3. Curva de velocidad sentido Valdespartera-Academia.....</i>	<i>13</i>
<i>Gráfico 4. Curva de altura sentido Academia-Valdespartera</i>	<i>13</i>
<i>Gráfico 5. Curva de altura sentido Valdespartera-Academia</i>	<i>14</i>
<i>Gráfico 6. Consumo según número de pasajeros.....</i>	<i>18</i>
<i>Gráfico 7. Variación porcentual del consumo según número de pasajeros.....</i>	<i>19</i>
<i>Gráfico 8. Curva de velocidad con y sin semáforo</i>	<i>20</i>
<i>Gráfico 9. Diferencia consumo con y sin semáforo</i>	<i>20</i>
<i>Gráfico 10. Curva velocidad con y sin semáforo (prueba)</i>	<i>21</i>

Gráfico 11. Diferencia consumo con y sin semáforo (prueba)	21
Gráfico 12. Curva de velocidad de diferentes conductores.....	22
Gráfico 13. Diferencia de consumo entre conductores	22
Gráfico 14. Diferencia de consumo con y sin viento	24
Gráfico 15. Ahorro energía con frenado regenerativo.....	25
Gráfico 16. Comparación resultados estudio y CIRCE.....	26
Gráfico 17. Comparación peso de batería según tipo.....	44
Gráfico 18. Representación del SOC y la velocidad a lo largo del recorrido	45
Gráfico 19. Detalle comparación SOC y velocidad	46
Gráfico 20. Potencia de carga de 300 kW en paradas sentido Academia-Valdespartera	47
Gráfico 21. Comparación SOC de batería de 102 kWh con y sin carga de 300 kW	48
Gráfico 22. Detalle comparación SOC.....	48
Gráfico 23. SOC de batería 53 kWh con carga en paradas	49
Gráfico 24. Potencia de carga de 300 kW sentido Academia-Valdespartera con tiempo fijo	51
Gráfico 25. Comparación SOC según tiempo de carga de 300 kW en paradas	51
Gráfico 26. Potencia de carga de 300 kW sentido Academia-Valdespartera con tiempo optimizado.....	54
Gráfico 27. Potencia de carga de 200 kW en paradas sentido Academia-Valdespartera	72
Gráfico 28. Comparación SOC de batería de 102 kWh con y sin carga de 200 kW	73
Gráfico 29. SOC de batería 69 kWh con carga en paradas	74
Gráfico 30. Potencia de carga de 400 kW en paradas sentido Academia-Valdespartera	75
Gráfico 31. Comparación SOC de batería de 102 kWh con y sin carga de 400 kW	75
Gráfico 32. SOC de batería de 37 kWh con carga en paradas	76
Gráfico 33. Potencia de carga de 500 kW en paradas sentido Academia-Valdespartera	77
Gráfico 34. Comparación SOC de batería de 102 kWh con y sin carga de 500 kW	78
Gráfico 35. SOC de batería de 20 kWh con carga en paradas	79
Gráfico 36. Potencia de carga de 200 kW sentido Academia-Valdespartera con tiempo fijo	80
Gráfico 37. Comparación SOC según tiempo de carga de 200 kW en paradas	80
Gráfico 38. Potencia de carga de 400 kW sentido Academia-Valdespartera con tiempo fijo	82
Gráfico 39. Comparación SOC según tiempo de carga de 400 kW en paradas	82
Gráfico 40. Potencia de carga de 500 kW sentido Academia-Valdespartera con tiempo fijo	83
Gráfico 41. Comparación SOC según tiempo de carga de 500 kW en paradas	84
Gráfico 42. Potencia de carga de 200 kW sentido Academia-Valdespartera con tiempo optimizado.....	85
Gráfico 43. Potencia de carga de 400 kW sentido Academia-Valdespartera con tiempo optimizado.....	86

Índice de tablas

Tabla 1. Valores y fuente de los parámetros	11
Tabla 2. Consumo Academia-Valdespartera.....	18
Tabla 3. Consumo Valdespartera-Academia.....	18
Tabla 4. Diferencia consumo con y sin semáforo.....	20
Tabla 5. Diferencia consumo con y sin semáforo (prueba)	21
Tabla 6. Diferencia de consumo entre conductores.....	23
Tabla 7. Diferencia de consumo con y sin viento	24
Tabla 8. Ahorro energía con frenado regenerativo	25
Tabla 9. Consumo total con 21.93 pasajeros/km.	26

Tabla 10. Datos de carga durante la noche	43
Tabla 11. Datos carga en extremos a 300 kW de potencia	45
Tabla 12. Resumen tiempos de recarga carga en extremos según potencia	46
Tabla 13. Datos de carga en paradas a 300 kW de potencia	49
Tabla 14. Resumen capacidad de baterías y tiempos de recarga con carga en paradas según potencia.....	50
Tabla 15. Datos de carga en paradas de 25 segundos a 300 kW	52
Tabla 16. Resumen capacidad de baterías y tiempos de recarga con carga en paradas de 25 segundos según potencia	52
Tabla 17. Datos de carga de 300 kW en paradas con tiempo optimizado	54
Tabla 18. Resumen capacidad de baterías y tiempos de recarga con carga en paradas con tiempo optimizado según potencia	55
Tabla 19. Comparación de potencias y situaciones de carga	55
Tabla 20. Datos sentido Academia-Valdespartera	67
Tabla 21. Datos sentido Academia-Valdespartera	68
Tabla 22. Variables utilizadas en modelo Matlab.....	69
Tabla 23. Datos carga en extremos a 200 kW de potencia	71
Tabla 24. Datos carga en extremos a 400 kW de potencia	71
Tabla 25. Datos carga en extremos a 500 kW de potencia	72
Tabla 26. Datos de carga en paradas a 200 kW de potencia	73
Tabla 27. Datos de carga en paradas a 400 kW de potencia	76
Tabla 28. Datos de carga en paradas a 500 kW de potencia	78
Tabla 29. Datos de carga en paradas de 25 segundos a 200 kW	81
Tabla 30. Datos de carga en paradas de 25 segundos a 400 kW	83
Tabla 31. Datos de carga en paradas de 25 segundos a 500 kW	84
Tabla 32. Datos de carga de 200 kW en paradas con tiempo optimizado	85
Tabla 33. Datos de carga de 400 kW en paradas con tiempo optimizado	86
Tabla 34. Tiempos de carga en cada parada de cada estudio.....	87

Índice de ecuaciones

Ecuación 1. Fuerza de resistencia a la rodadura	8
Ecuación 2. Fuerza de resistencia aerodinámica	8
Ecuación 3. Fuerza de ascensión	8
Ecuación 4. Fuerza de aceleración	8
Ecuación 5. Fuerza de aceleración de las masas rotativas	9
Ecuación 6. Capacidad de batería con carga en cocheras	44
Ecuación 7. Capacidad de batería con carga en extremos de 300 kW	45
Ecuación 8. Tiempo de recarga de baterías con carga en extremos de 300 kW	46
Ecuación 9. Capacidad de batería con carga en paradas de 300 kW	49
Ecuación 10. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas de 300 kW	50
Ecuación 11. Capacidad de batería con carga en paradas de 25 segundos a 300 kW	52
Ecuación 12. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas de 25 segundos a 300 kW	52
Ecuación 13. Capacidad de batería con carga en paradas con tiempo optimizado a 300 kW	54

<i>Ecuación 14. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas con tiempo optimizado a 300 kW</i>	54
<i>Ecuación 15. Tiempo de recarga de baterías con carga en extremos de 200 kW</i>	71
<i>Ecuación 16. Tiempo de recarga de baterías con carga en extremos de 400 kW</i>	71
<i>Ecuación 17. Tiempo de recarga de baterías con carga en extremos de 500 kW</i>	72
<i>Ecuación 18. Capacidad de batería con carga en paradas de 200 kW</i>	73
<i>Ecuación 19. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas de 200 kW</i>	74
<i>Ecuación 20. Capacidad de batería con carga en paradas de 400 kW</i>	76
<i>Ecuación 21. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas de 400 kW</i>	77
<i>Ecuación 22. Capacidad de batería con carga en paradas de 500 kW</i>	78
<i>Ecuación 23. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas de 500 kW</i>	79
<i>Ecuación 24. Capacidad de batería con carga en paradas de 25 segundos a 200 kW</i>	81
<i>Ecuación 25. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas de 25 segundos a 200 kW</i>	81
<i>Ecuación 26. Capacidad de batería con carga en paradas de 25 segundos a 400 kW</i>	83
<i>Ecuación 27. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas de 25 segundos a 400 kW</i>	83
<i>Ecuación 28. Capacidad de batería con carga en paradas de 25 segundos a 500 kW</i>	84
<i>Ecuación 29. Capacidad de batería con carga en paradas con tiempo optimizado a 200 kW</i>	85
<i>Ecuación 30. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas con tiempo optimizado a 200 kW</i>	86
<i>Ecuación 31. Capacidad de batería con carga en paradas con tiempo optimizado a 400 kW</i>	86
<i>Ecuación 32. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas con tiempo optimizado a 400 kW</i>	86

1. INTRODUCCIÓN

La energía es un recurso limitado. Su constante aumento de costes y el compromiso de muchos países de reducir las emisiones de CO₂, lleva a la necesidad de desarrollar sistemas que permitan reducir su consumo [17], [18]. Los más utilizados en medios de transporte, son aquellos que capaces de almacenar la energía generada durante el frenado.

Actualmente, la mayoría de tranvías alimentados por corriente continua, son capaces de recuperar energía durante el frenado y enviarla a la red. Al frenar, los motores actúan como generadores, transformando la energía cinética en eléctrica. Parte de esta energía se utiliza para alimentar diferentes sistemas auxiliares, mientras que el resto es enviada a la red eléctrica para ser aprovechada por el siguiente tren. Sin embargo, esto tiene sus limitaciones. La distancia entre ambos tranvías ha de ser menor a 1 km y para poderse aprovechar, uno de ellos tiene que estar frenando mientras el otro demanda un pico de energía, como por ejemplo, al acelerar [17]. Estas condiciones, no siempre se dan por lo que la energía recuperada no siempre puede aprovecharse.

Mejorar la eficiencia energética de estos vehículos ha sido uno de los principales objetivos de la industria del sector [17]. En los últimos años se han conseguido grandes avances en ello gracias en parte al desarrollo de supercondensadores en los que almacenar la energía de frenado. Disponer de estos sistemas, permite al tranvía almacenarla de manera más eficiente para utilizarla cuando la necesite, sin las restricciones que tenía enviarla a la red. La elevada densidad de potencia y de energía de los supercondensadores, unido a su elevado número de ciclos de vida, los hacen muy útiles para esta función.

Poder almacenar la energía hasta que se necesite puede suponer un ahorro de electricidad superior al 30% [17], al poder utilizar la almacenada cuando la demanda sea elevada, el lugar de tomarla de la red. Pero el ahorro no es la única ventaja. Son muchas las líneas de tranvía a lo largo de Europa, que tienen algún tramo dónde no existe catenaria. En estos trozos el tranvía circula únicamente gracias a la energía que almacena en baterías o supercondensadores, que se recargan durante el frenado y conectándose a la red eléctrica en las paradas. Esto permitiría la instalación de líneas en aquellos sitios en los que por estética o cualquier otra razón, no estuviese permitida la utilización de catenaria, como por ejemplo, delante de monumentos o edificios históricos.

El proyecto que se expone a continuación consiste en el cálculo del consumo energético que tiene un tranvía a lo largo de todo su recorrido y el estudio de diferentes métodos de carga de baterías por inducción que permitan la eliminación total de la catenaria. La línea estudiada ha sido la del tranvía de Zaragoza, desarrollado por la empresa “Construcciones y Auxiliar de Ferrocarriles S.A. (CAF)” El tranvía incorpora un sistema desarrollado por la propia empresa llamado ACR (*Acumulador de carga rápida*). También incluye un tramo de poco más de 2 km de longitud sin catenaria, siendo uno de los más largos existentes en Europa en los que el tranvía funciona únicamente con sus propias baterías.

No se ha dispuesto de datos reales de consumo por parte de la empresa al considerarse confidenciales, por lo que el análisis ha tenido que basarse en una extensa y compleja búsqueda bibliográfica, junto con datos tomados en campo en cuanto al recorrido del tranvía.

En la sección 2 se plantea el objetivo principal del proyecto enumerando que pasos que se han seguido para lograrlo. En la sección 3 se expone un análisis histórico de cómo ha evolucionado el tranvía desde su aparición hasta nuestros días. En la sección 4 se detalla cómo se ha calculado el consumo del tranvía. En ella se explica el funcionamiento de un tranvía, cómo se han obtenido los datos, los cálculos realizados y diferentes situaciones que puedan afectar al consumo total. En la sección 5 se calcula las baterías que necesitaría llevar para poder eliminar la catenaria, según diferentes situaciones de carga y comparando varias potencias. En la sección 6 se exponen las conclusiones finales. En la sección 7 se plantean líneas de trabajo futuras tomando como base este proyecto. En la sección 8 se encuentran los anexos con información complementaria al resto de secciones. Por último, la sección 9, recoge todas las referencias bibliográficas empleadas.

2. OBJETIVOS

El objetivo principal del proyecto es el expuesto a continuación:

- Estudiar la posibilidad de instalar un sistema de carga inductivo para cargar baterías por medio de las cuales el tranvía se desplazaría de manera autónoma sin necesidad de tomar electricidad de la catenaria que actualmente utiliza, pudiendo ser eliminada. Para ello, se ha de seguir los siguientes pasos:
 - En primer lugar, se debe conocer cómo funciona un tranvía. Será necesario entender para qué sirve cada elemento que incorpora (motor-generator, baterías...), los sistemas de los que dispone (frenado regenerativo, carga por conexión a la red...) y cuáles son las fuerzas que ha de vencer para desplazarse. Habrá que medir la velocidad del tranvía, para calcular el consumo eléctrico teórico del motor para lo que también se deberá saber el gasto de los sistemas auxiliares.
 - Se deberá crear un modelo informático con el programa Matlab/Simulink que permita realizar todos los cálculos necesarios según los datos obtenidos (peso, dimensiones, eficiencias del tren motriz...) y que muestre mediante gráficas y valores numéricos los resultados del consumo teórico.
 - El siguiente paso será comprobar que el programa funciona correctamente. Cuando lo haga, se introducirán los datos referentes al tranvía de Zaragoza y se ejecutarán los cálculos. Se realizarán varios análisis variando algunos valores de entrada para entender la influencia de estos y se estudiarán situaciones que puedan suponer un aumento del consumo esperado. Tras ello, los resultados se compararán con los de estudios similares para comprobar que son correctos analizando las posibles razones por las que puedan ser ligeramente distintos si es que lo son.
 - Conocido el consumo, se estudiará el tamaño de las baterías necesarias para que el tranvía se pueda desplazar sin necesidad de tomar corriente de la catenaria y de esta manera poder eliminarla. Se planteará un sistema de carga de baterías por inducción según diferentes situaciones de puntos de carga, duración y potencia de las mismas.

3. ANÁLISIS HISTÓRICO

El primer tranvía de la historia apareció en Swansea, al sur de Gales. Era un coche de caballos fabricado por el parlamento británico en 1804 que comenzó dando servicio a la línea Swansea-Oystermouth, para trabajos de minería. Posteriormente, en 1807, recibió el permiso para llevar pasajeros. En 1832, se inauguró en Nueva York el primer tranvía de Estados Unidos como una evolución de los conocidos como *omnibus*. Eran vehículos tirados por caballos o mulas aunque ocasionalmente se probaron con otros animales. Años después fueron apareciendo en países como Francia, Chile o Australia. Inicialmente, los raíles de estos medios de transporte iban sobre la calzada, pero a partir de 1852, debido a los accidentes que causaba a los peatones, fueron enterrados.



Ilustración 1. Tranvía de Swansea



Ilustración 2. Tranvía de vapor en Italia

Los primeros tranvías de tracción mecánica funcionaban con vapor. La mayoría tenían una pequeña locomotora que tiraba del resto de vagones y se comenzaron a desarrollar en 1873. Se tomaron medidas de seguridad para hacerlos aptos para funcionar en zonas residenciales. Las partes móviles fueron protegidas y normalmente se utilizaba coque en lugar de carbón para evitar las emisiones de humo.

El siguiente sistema fue el llamado *Cable car*. El tranvía se enganchaba a un cable móvil que tiraba de él. Se probó por primera vez en San Francisco en 1873. Su éxito llevó a otras ciudades de Norteamérica, Australia y Nueva Zelanda a instalar sistemas similares. Sin embargo, estos tranvías tenían sus desventajas. Los costes de infraestructura eran muy elevados y si un cable se rompía (cosa que ocurría frecuentemente), se debía suspender el servicio de toda la línea para repararlo. Ello junto al desarrollo de nuevas tecnologías hizo que muchos de ellos fueran sustituidos rápidamente. Actualmente existen muy pocos tranvías de este tipo y se utilizan más como atracción turística, siendo el de San Francisco el más famoso.



Ilustración 3. Cable car en San Francisco

Las primeras pruebas con tranvías eléctricos se hicieron en San Petersburgo en 1880. Como los actuales, llevaba un pantógrafo en la parte superior con el que tomaba la corriente de un cable suspendido sobre él. En 1881, entró en servicio la primera línea regular de tranvía eléctrico en Berlín, fabricado por Siemens. Durante los últimos años del siglo 19, ciudades de todo el mundo instalaron sus líneas de tranvía. Algunas probaron diferentes soluciones. Destaca Bendigo, Australia, que en 1892 probó a utilizar baterías como única fuente de alimentación, desechándolas tres meses después al no tener éxito. Siemens también probó un sistema en el que la electricidad iba por la vía, pero las electrocuciones que causaba a la gente que cruzaba por encima hicieron que finalmente desarrollase cables aéreos.

Desde la invención de los tranvías eléctricos, casi todos los avances tecnológicos se han centrado en mejorarlos y hacerlos más eficientes. Sin embargo, en algunas ocasiones se desarrollaron otros sistemas. Entre 1880 y 1920, se utilizaron tranvías de gas en algunas ciudades. En París hubo modelos que funcionaban con aire comprimido y en Galveston, Tejas se utilizaron tranvías diesel debido a que la alta probabilidad de huracanes dañaría el tendido eléctrico. Recientemente, en marzo de 2015, se presentó en China el primer prototipo en utilizar célula de combustible.

En los últimos años se han llevado a cabo numerosas evoluciones tecnológicas. Desde 1990, muchos tranvías han sido sustituidos por modelos de suelo bajo. En el año 2000, la compañía *Alstom* introdujo un sistema que tomaba la corriente de un tercer raíl, eliminando de esta forma la catenaria. En el mismo año, *Bombardier* sacó el sistema LRV, que utilizaba baterías que se recargaban por inducción. En algunas ciudades, se utiliza una variante del tranvía tradicional llamado *Translohr*. Tiene un único raíl central que sirve de guía y ruedas neumáticas. Esto le permite subir pendientes más pronunciadas y hacer giros más cerrados.



Ilustración 4. Sistema con tercer raíl



Ilustración 5. Translohr en Clermont-Ferrad

4. CONSUMO

4.1. FUNCIONAMIENTO DE UN TRANVÍA

Para la realización del proyecto, lo primero fue familiarizarse con el funcionamiento de un tranvía. Para ello, se buscó información en internet, utilizando el portal de búsqueda IEEE, especializado en artículos de ingeniería. Esta tarea resultó extensa y compleja debido a que la mayoría de la documentación, era de estudios específicos en los que había poca información general.

Esta búsqueda permitió conocer los diferentes elementos que intervienen en el funcionamiento de un tranvía. La *Figura 1* muestra un esquema de las partes en las que se divide el sistema motriz [20].

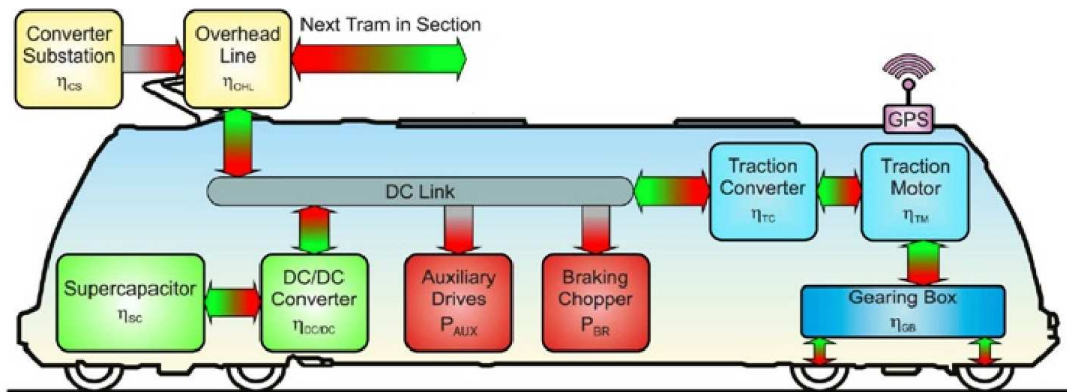


Figura 1. Esquema de un tranvía

Cuando el tren está conectado a la catenaria, recibe la energía de ella a través del pantógrafo. Para alimentar al motor, esta pasa por el convertidor de tracción. En él se ajusta el voltaje, la frecuencia y el tipo de corriente suministrada por la red (continua o alterna), a la necesaria para el funcionamiento de los motores [23]. La fuerza suministrada por el motor, pasa por la transmisión hasta llegar a las ruedas. Durante el frenado, se sigue el orden inverso. El movimiento de las ruedas hace girar el motor, que ahora funciona como generador, produciendo electricidad y enviándola de nuevo a la línea de corriente continua tras pasar por el convertidor de tracción. Desde ella, puede volver a la catenaria o cargar los supercondensadores o baterías que llevase, pasando antes por un convertidor DC/DC para volver a ajustar el voltaje. A esta línea, también van conectados los diferentes sistemas auxiliares.

Conocer los diferentes elementos y su eficiencia, permite calcular la energía total consumida, teniendo en cuenta las pérdidas. La *Figura 2* muestra un esquema muestra porcentajes medios de los diferentes consumos y perdidas que tiene un tranvía en funcionamiento [4].

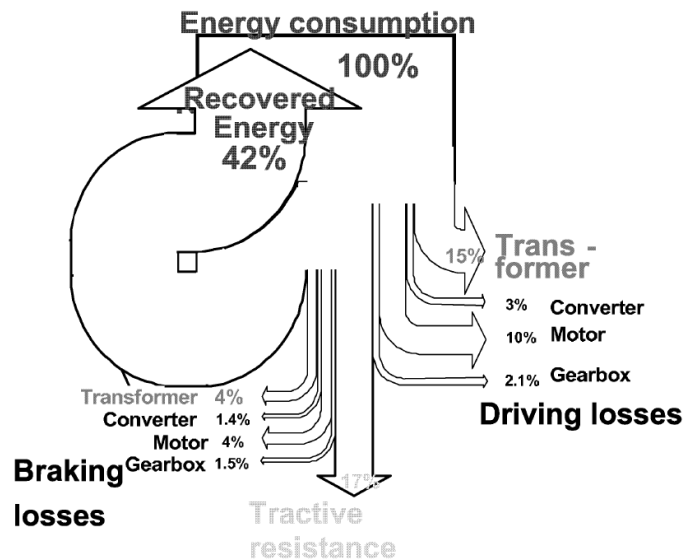


Figura 2. Consumos y pérdidas de un tranvía

Como se observa en la *Figura 2*, una gran cantidad de energía, se pierde a lo largo de los diferentes elementos de los que se compone el tranvía, la mayoría en los transformadores y el motor. Una optimización de estos, supondría un gran ahorro energético y económico. Destaca que con la tecnología actual, gracias al frenado regenerativo se puede recuperar hasta un 42% de la energía necesaria aproximadamente. Como se comentará más adelante, no toda la energía de frenado se puede recuperar, existiendo pérdidas también en motor y convertidores, a las que habría que añadir las de la eficiencia de almacenamiento de la baterías. Más adelante se compararán los resultados del ensayo realizado, con los valores de esta figura.

4.2. MÉTODO DE CÁLCULO DE CONSUMO DE UN TRANVÍA

Conocidas las diferentes partes del sistema motriz de un tranvía, el siguiente paso es calcular la fuerza que debe aportar el motor para su desplazamiento. La resistencia que debe vencer se compone de diferentes fuerzas resistivas. Estas son las mismas para cualquier tipo de vehículo, aunque sus valores serán diferentes de uno a otro. Para entender más en detalle estas fuerzas, se ha acudido a la bibliografía y documentación utilizada en diferentes asignaturas durante el curso. A continuación se exponen las fuerzas mencionadas.

- **Fuerza de resistencia a la rodadura (F_{rr}):** La resistencia a la rodadura se presenta cuando un cuerpo rueda sobre una superficie, deformándose uno de ellos o ambos. Dependerá entre otros parámetros del material de la rueda y de la superficie sobre la que rueda.

$$F_{rr} = C_r * P * \cos \theta$$

C_r = Coeficiente de rodadura P = Peso del vehículo [N] θ = ángulo de pendiente [rad]

Ecuación 1. Fuerza de resistencia a la rodadura

- **Fuerza de resistencia aerodinámica (F_{ad}):** Es la fuerza que sufre un cuerpo en sentido opuesto al moverse a través de un fluido en la dirección de la velocidad. El tamaño de la sección frontal y su forma influirán mucho en el valor final de la fuerza. También lo hará la velocidad, siendo esta una de las mayores fuerzas que deberá vencer.

$$F_{ad} = \frac{\rho}{2} * C_d * S * v^2$$

ρ = densidad aire [kg/m³] C_d = coeficiente aerodinámico S = Sección frontal [m²] v = velocidad [m/s]

Ecuación 2. Fuerza de resistencia aerodinámica

- **Fuerza de ascensión (F_{as}):** Es la fuerza de la gravedad cuando el vehículo sube o baja una pendiente. La máxima pendiente a lo largo del recorrido estudiado es menor del 2.5% por lo que su valor total será muy pequeño.

$$F_{as} = P * \sin \theta$$

Ecuación 3. Fuerza de ascensión

- **Fuerza de aceleración (F_{acl}):** Es la fuerza de inercia para aumentar o disminuir la velocidad.

$$F_{acl} = \frac{dv}{dt} * m = m * a$$

m = masa del vehículo [Kg] a = aceleración [m/s²]

Ecuación 4. Fuerza de aceleración

- **Fuerza aceleración masas rotativas (F_{aca}):** Fuerza para acelerar las masas rotativas de la transmisión. Depende de la mecánica de cada vehículo. Dada su complejidad para calcularla, se aproxima cómo un porcentaje de la fuerza de aceleración normal.

$$F_{aca} = \gamma * F_{acl}$$

γ = Coeficiente aceleración masas rotativas

Ecuación 5. Fuerza de aceleración de las masas rotativas

Se ha creado un modelo con el programa Matlab/Simulink, en el que se han implementado estas fórmulas, de tal manera que se pueda obtener el valor final de consumo de energía rápidamente para diferentes situaciones y variando algún parámetro para ver su influencia. Como la velocidad va variando, se creará una curva de velocidad-tiempo que se introducirá en Matlab. Este modelo se explicará detalladamente más adelante.

4.3. TOMA DE DATOS DEL TRANVÍA DE ZARAGOZA

Antes de analizar más en detalle la línea del tranvía de Zaragoza, se ha realizado un breve estudio de cómo es. La longitud total de la línea es de aproximadamente 12.8 km. Consta de 25 paradas, con una separación media cercana a 500 m. El recorrido incluye un tramo de unos 2 km de longitud en el centro histórico, dónde no existe catenaria. En este trayecto, el tranvía toma la corriente de los ultracondensadores y baterías que incorpora y que recarga durante el frenado y conectándose a la red eléctrica en las paradas. Además, incorpora un sistema de prioridad semafórica dinámica, lo que le permite circular sin parar en los cruces. Utiliza dos motores trifásicos asíncronos y la alimentación es de 750 V en corriente continua.



Ilustración 6. Tranvía de Zaragoza circulando sin catenaria



Ilustración 7. Mapa recorrido del tranvía

Una vez conocido el funcionamiento de un tranvía y las fuerzas que ha de vencer para desplazarse, se trató de obtener todos los valores necesarios, que aplicándolos a las fórmulas anteriormente mencionadas, permiten calcular el consumo teórico que tendría el tranvía.

En primer lugar, se solicitó información a CAF sobre las características propias del tranvía de Zaragoza. Debido a la política de confidencialidad de la empresa, la única información que facilitó, fue el cuadríptico presentado públicamente cuando se inauguró la línea¹. En él se encontraban algunos de los datos necesarios, aunque no todos. Al no poder obtener más información por parte de CAF, se buscó en internet, valores medios para los datos que faltaban, de otros tranvías. Finalmente, tras una extensa búsqueda, se encontró un artículo sobre ahorro de energía en transportes públicos [1] basado en el tranvía de Bruselas, fabricado por la empresa “Bombardier” y otro de un modelo de simulación de un tranvía con sistema de almacenamiento de energía [18]. Con los datos obtenidos de este estudio y los facilitados por CAF, ya se tenían todos los parámetros constantes necesarios para calcular el consumo. La *Tabla 1* muestra los valores de los diferentes parámetros de las fórmulas anteriores, y la fuente de la que se han obtenido.

¹ El cuadríptico completo se encuentra en el ANEXO I. Cuadríptico del tranvía de Zaragoza

Parámetro	Valor	Fuente
Masa [kg]	45.450 + 296*75	CAF
Superficie frontal [m ²]	9,54	CAF
Radio rueda [m]	0,295	CAF
Coef. Resistencia rodadura	0,006	Bombardier
Coef. Aerodinámico	0,6	Bombardier
Eficiencia transmisión	93%	Bombardier
Eficiencia motor	90%	Bombardier
Eficiencia convertidor	91%	Bombardier
Eficiencia drivemotor	91%	Bombardier
Eficiencia frenado regenerativo	55%	Bombardier
Coef. acel. Masas rotativas	0,2	[18]
Densidad aire [kg/m ³]	1,25	-
Gravedad [m/s ²]	9,81	-

Tabla 1. Valores y fuente de los parámetros

Posteriormente se pasó a obtener la curva de velocidad del tranvía a lo largo de todo su recorrido. Para conocer la velocidad en cada momento se utilizó la aplicación móvil “My Tracks”. Esta aplicación utiliza el GPS del teléfono para saber su posición. Conforme uno se desplaza, va tomando datos y calculando la velocidad según la distancia recorrida. Se emplea principalmente para “Running”, sin embargo, resulta útil para obtener la curva deseada. La razón por la que se usó esta aplicación entre todas las existentes, fue la facilidad con la que se pueden pasar los datos a una hoja de cálculo en ordenador para ser editados.

Para tener una primera aproximación de la curva, se realizó un trayecto completo de ida y vuelta entre los dos extremos de la línea del tranvía. Durante todo el trayecto, la aplicación fue recogiendo datos de posición y velocidad entre otros. Al mismo tiempo se fue cronometrando el tiempo empleado para desplazarse entre cada parada y el que permanece estacionado en cada una. Tras pasar estos datos a ordenador y tratar de editarlos con el programa “Microsoft Office Excel”, se observó que la curva era muy irregular y que en algunos puntos se perdía la señal GPS y la aplicación trazaba una línea recta. Esto puede ser debido a interferencias con árboles, cables u otros dispositivos electrónicos presentes a lo largo del recorrido, o a que el GPS del teléfono del que se disponía no es muy preciso dada su antigüedad (aproximadamente dos años y medio). El *Gráfico 1* muestra parcialmente la curva de velocidad obtenida en esta primera toma de datos.

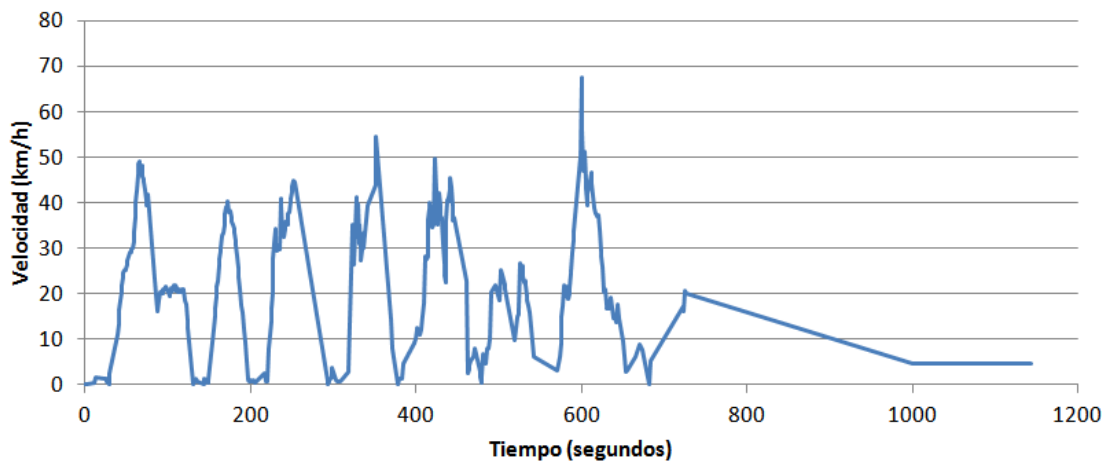


Gráfico 1. Curva de velocidad inicial

Para solucionar este problema, se realizaron varios recorridos en ambos sentidos para tener mayor cantidad de datos y poder obtener la curva real calculando una velocidad media aproximada en cada momento, así como el tiempo transcurrido entre cada parada y el estacionado en cada una.

4.4. Cálculo de la velocidad

Tras obtener información de varios trayectos, se procedió al cálculo de la curva de velocidad final. Lo primero que se observó es que la velocidad máxima alcanzada entre dos mismas paradas es muy similar en todos los recorridos realizados, igual que el tiempo entre ellas cuya diferencia es menor a dos segundos. Con estos datos, se fue corrigiendo una de las curvas filtrando las irregularidades mencionadas anteriormente, eliminando los datos erróneos y ajustando los tiempos entre paradas a la media de los diferentes recorridos. Para mayor exactitud, se calculó matemáticamente la distancia recorrida según la curva obtenida y comparándola con la distancia real, obtenida de “Google maps”, se fueron haciendo los ajustes necesarios. Una vez finalizado el extenso cálculo (en cada trayecto, la aplicación recogió información de cerca de 1500 puntos), se obtuvo la curva final para cada sentido, presentes en el Gráfico 2 y Gráfico 3.

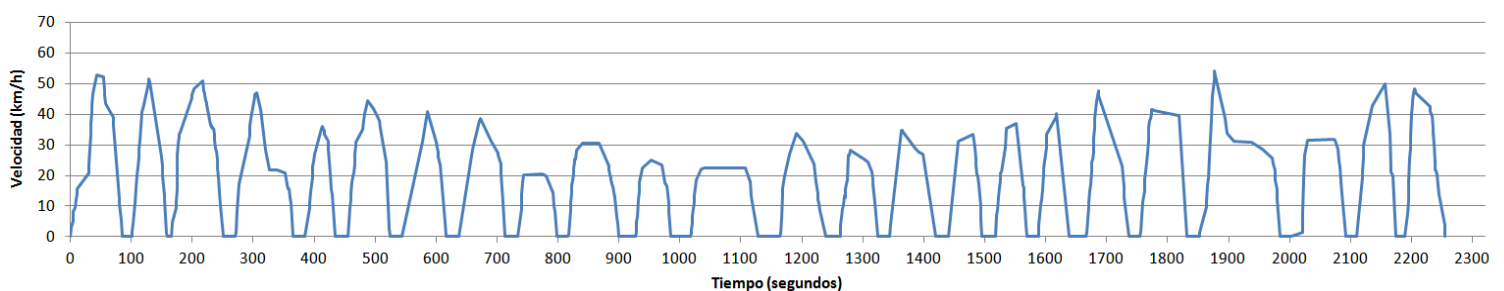


Gráfico 2. Curva de velocidad sentido Academia-Valdespartera

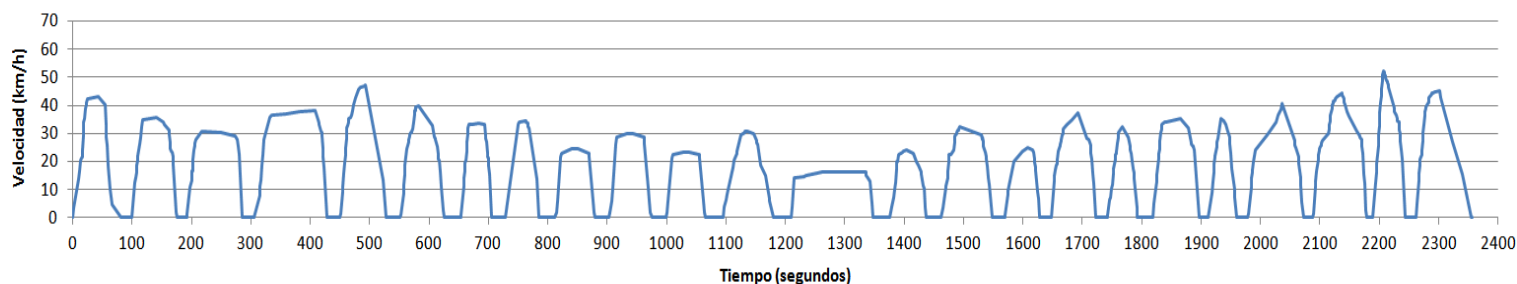


Gráfico 3. Curva de velocidad sentido Valdespartera-Academia

La duración total de ambos trayectos es de aproximadamente 40 minutos cada uno. La máxima velocidad alcanzada entre la mayoría de paradas, oscila entre los 30 y los 40 km/h, llegando en alguna ocasión a los 50 en zonas de poco tráfico y no llegando a los 30 en otras, al circular por zonas peatonales con gran afluencia de público cruzando la vía. La velocidad media en todo el recorrido es por tanto es de unos 20 km/h. La duración de casi todas las paradas es alrededor de 20 segundos, siendo ligeramente inferior las de las zonas de Valdespartera y Parque Goya, y superando los 30 segundos las del centro de la ciudad, debido a la afluencia de público.

Además de la velocidad, la aplicación también mide la altura sobre el nivel del mar. Esta información resulta útil para calcular la pendiente que sube o baja en cada momento y con ella calcular la fuerza de ascensión. A diferencia de la velocidad en dónde se comparó la distancia recorrida calculada con la real para ajustar la curva, en este caso no se disponía de datos reales por lo que sólo se han podido utilizar los obtenidos por la aplicación. Esto unido a que la forma en la que un GPS calcula la altura hace que la medición sea más difícil en lugares con muchos obstáculos (edificios, árboles...), pudiendo llegar a dar errores de ± 20 metros, hacen que la curva obtenida deba considerarse como una aproximación y no como real. Por esta razón, la energía necesaria para vencer la fuerza de ascensión que se calculará posteriormente puede ser ligeramente diferente a la real. A continuación, el *Gráfico 4* y el *Gráfico 5* muestran la curva altura-distancia en cada uno de los sentidos.

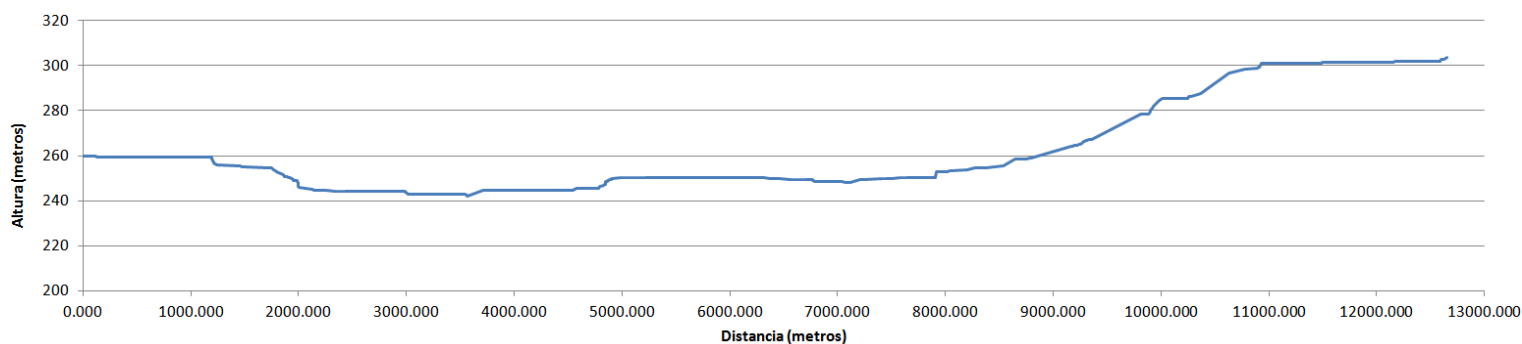


Gráfico 4. Curva de altura sentido Academia-Valdespartera

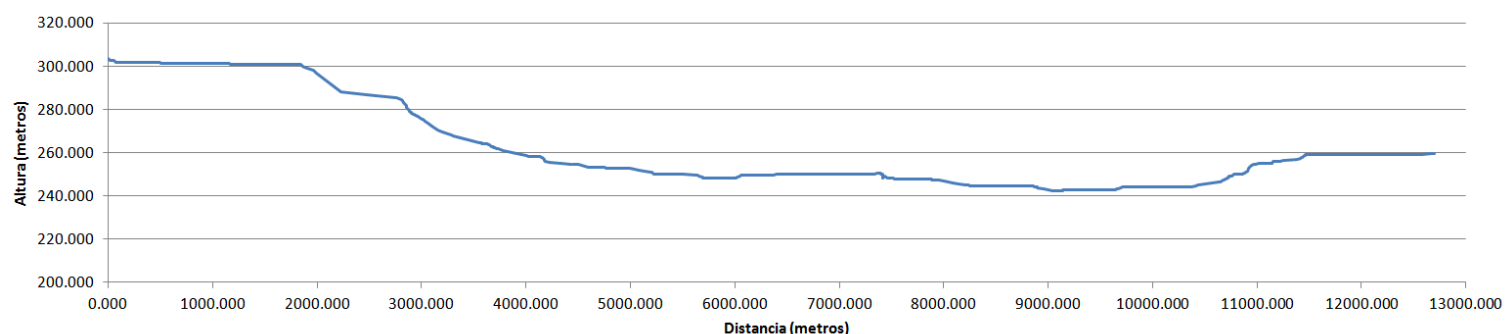


Gráfico 5. Curva de altura sentido Valdespartera-Academia

En los extremos y en el centro, el terreno es completamente llano. El desnivel entre ambos finales de línea es de aproximadamente 40 metros, ascendiendo a 55 el máximo. Entre Valdespartera y el centro se encuentra el desnivel más significativo con una pendiente media del 0,01%, con un máximo cercano al 0,2%².

4.5. Creación de un modelo de cálculo

Conocidos todos los datos necesarios, el siguiente punto fue calcular el consumo del tranvía. Para ello se utilizó el programa Matlab/Simulink. En él se creó un modelo que a partir de las curvas de velocidad y altura calculadas y los parámetros obtenidos de CAF y Bombardier, realiza las operaciones explicadas anteriormente para calcular el consumo teórico final. La *Figura 3* y la *Figura 4* muestran el modelo empleado.

Se ha creado de manera que se pueda calcular para diferentes curvas sin necesidad de hacer modificaciones. Basta con cambiar el parámetro de entrada por el deseado en cada momento. Además del resultado final, el sistema también proporciona una gráfica que muestra la evolución de la energía empleada en la que se puede diferenciar cuando consume (acelera), cuando recarga (frena) y cuando permanece invariable (parado) Aunque en este proyecto no se utiliza, el modelo calcula el par en rueda necesario en cada momento. Este dato se podría utilizar para saber el par que debería entregar el motor en caso de querer optimizarlo.

² En el ANEXO II puede consultarse información más detallada de estas curvas

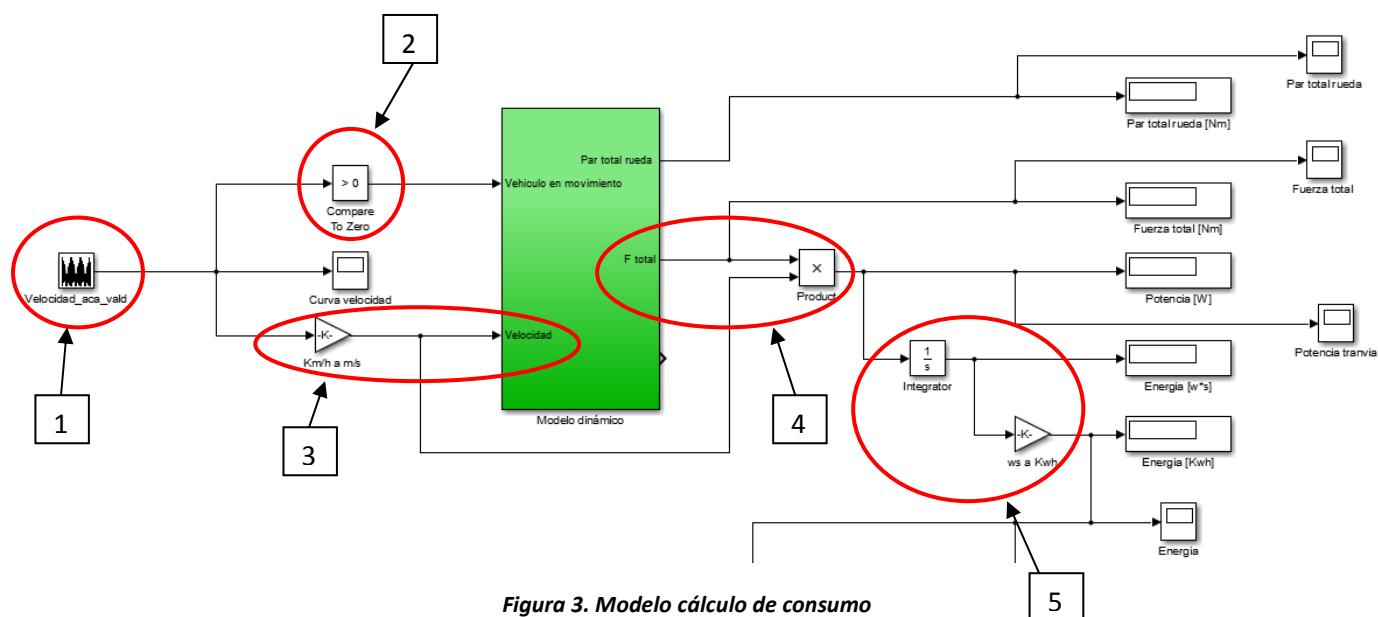


Figura 3. Modelo cálculo de consumo

La *Figura 3* representa el modelo principal de trabajo. En él se encuentra el parámetro de entrada más importante: la curva de velocidad (1). El componente "*Compare To Zero*" (2) sirve para identificar cuándo el tranvía se desplaza y cuándo está detenido. Más adelante se explicará para que se utiliza. Tras convertir las unidades de km/h a m/s, el valor se introduce en el modelo dinámico (3), el cual se explicará a continuación. Al mismo tiempo, se multiplica por la resultante de este para conocer la potencia necesaria (4). Tras integrar y convertir las unidades a un orden más cómodo de trabajo (5), se obtiene la energía que habrá que suministrar al motor, tanto el valor total, cómo la curva que representa su evolución. Este dato se utilizará más adelante para la carga de baterías y se explicará su funcionamiento en el apartado correspondiente.

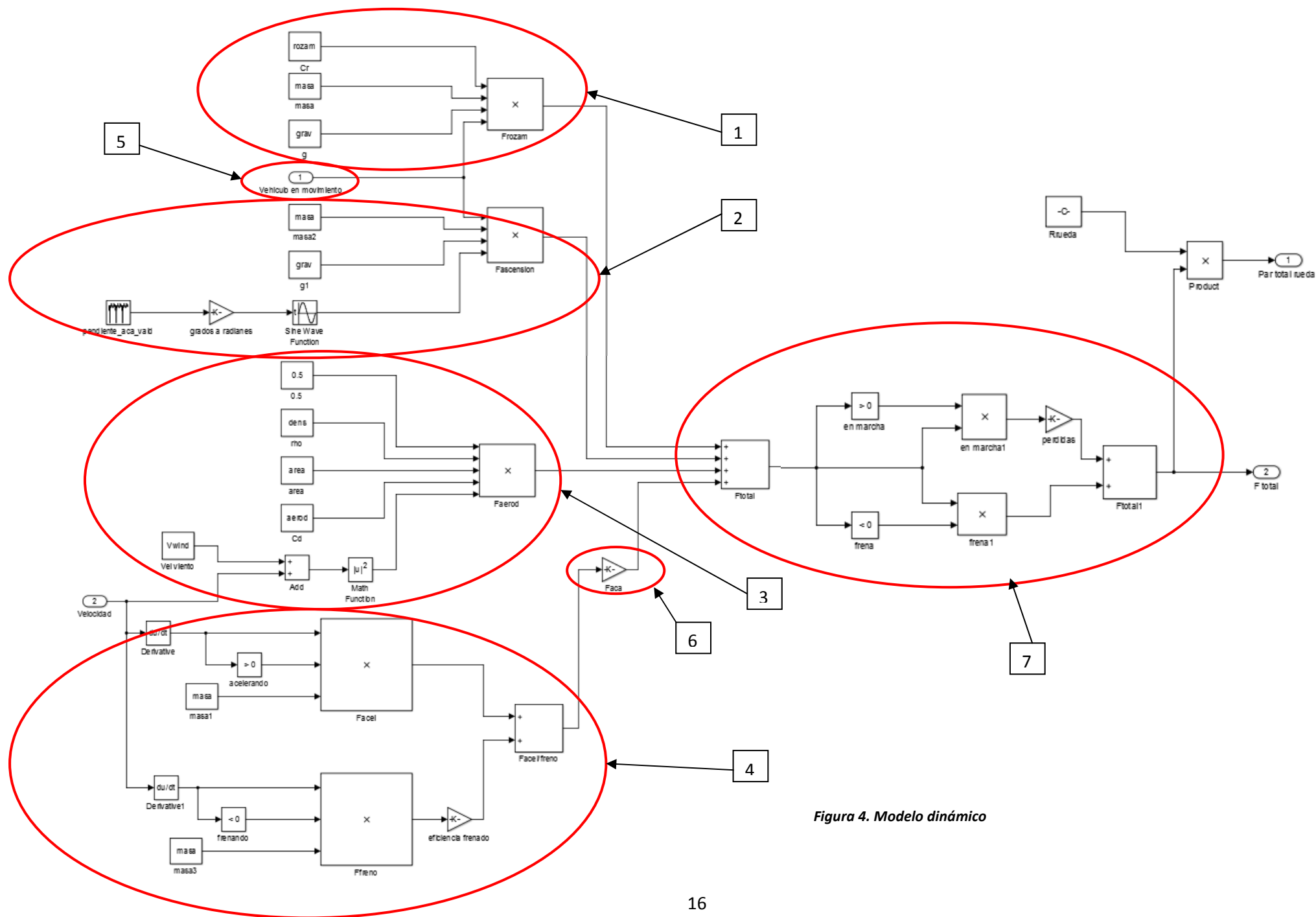


Figura 4. Modelo dinámico

La *Figura 4* corresponde al modelo dinámico en detalle. En él están representadas todas las ecuaciones utilizadas para el cálculo del consumo. Las diferentes variables se van multiplicando para obtener el valor de cada fuerza, los cuales posteriormente se sumarán para conocer la total.

Para el cálculo de la fuerza de resistencia aerodinámica (3), (*Ecuación 2*), el modelo permite incluir la velocidad del viento. Inicialmente ésta se ha tomado como nula, aunque más adelante se realizará un estudio para ver cómo influye.

Debido a que las fuerzas de resistencia a la rodadura (1) (*Ecuación 1*) y ascensión (2) (*Ecuación 3*) no dependen directamente de la velocidad, se han multiplicado por el valor de entrada “Vehículo en movimiento” (5), procedente del “Compare To Zero” anteriormente comentado, que toma valor nulo si lo es la velocidad. De esta forma si el tranvía está detenido la fuerza resulta nula. Un concepto similar se ha utilizado en la fuerza de aceleración (4) (*Ecuación 4*). Cuando es positiva se suma su valor directamente pero cuando es negativa (frenando), se multiplica por el coeficiente de eficiencia de frenado regenerativo. Tras ello, se multiplica por el coeficiente de aceleración de masas rotativas para incluir la fuerza de aceleración de ellas (6).

Finalmente, cuando la fuerza total es positiva, se divide entre la eficiencia de toda la cadena (transmisión, motor, convertidores...) para saber cuál es la energía que ha de suministrarse. Este cálculo no se hace si es negativa, debido a que ya se ha tenido en cuenta en el coeficiente de frenado regenerativo (7). Al utilizar variables como datos de entrada, permite realizar cálculos en diferentes condiciones, cambiando su valor desde la lista de variables creada³. Gracias a ello se puede estudiar cómo afecta el incremento de peso total, el porcentaje de energía recuperada o incluso la velocidad del viento, entre otros parámetros, en el consumo final, sin hacer ninguna modificación en el modelo.

4.6. Cálculo del consumo

Una vez se tuvo el modelo construido y después de comprobar que funcionaba correctamente, se procedió al cálculo de la energía necesaria para el funcionamiento del tranvía. Con el objetivo de obtener un resultado lo más parecido al real, se estudiaron diferentes aspectos que pudiesen influir en el valor final, como la necesidad de efectuar una parada no programada, la forma de conducir del conductor o la velocidad del viento.

El primer ensayo se realizó de extremo a extremo en ambos sentidos y sin interrupciones anómalas. Los cálculos se hicieron suponiendo diferentes cantidades de pasajeros para ver cómo afecta el incremento de peso [22]. Los resultados de este ensayo se pueden ver en la *Tabla 2* y la *Tabla 3*. La diferencia de distancia entre cada sentido y la real se deben a los errores de medición anteriormente explicados.

³ La lista de variables, su significado y su valor se encuentran en el Anexo III

Sentido	Academia-Valdespartera
Distancia	12,65 Km

Sentido	Valdespartera-Academia
Distancia	12,69 Km

Pasajeros	Consumo (kWh)	Consumo (kWh/km)
0	33,87	2,677
20	34,95	2,763
40	36,04	2,849
60	37,06	2,930
80	38,18	3,018
100	39,27	3,104
120	40,31	3,187
140	41,36	3,270
160	42,44	3,355
180	43,51	3,440
200	44,58	3,524
220	45,63	3,607
240	46,73	3,694
260	47,81	3,779
280	48,84	3,861
296	49,73	3,931

Tabla 2. Consumo Academia-Valdespartera

Pasajeros	Consumo (kWh)	Consumo (kWh/km)
0	29,33	2,311
20	30,25	2,383
40	31,17	2,456
60	32,12	2,531
80	33,02	2,601
100	33,94	2,674
120	34,89	2,749
140	35,80	2,820
160	36,84	2,902
180	37,66	2,967
200	38,58	3,039
220	39,48	3,110
240	40,47	3,188
260	41,38	3,260
280	42,28	3,331
296	43,04	3,391

Tabla 3. Consumo Valdespartera-Academia

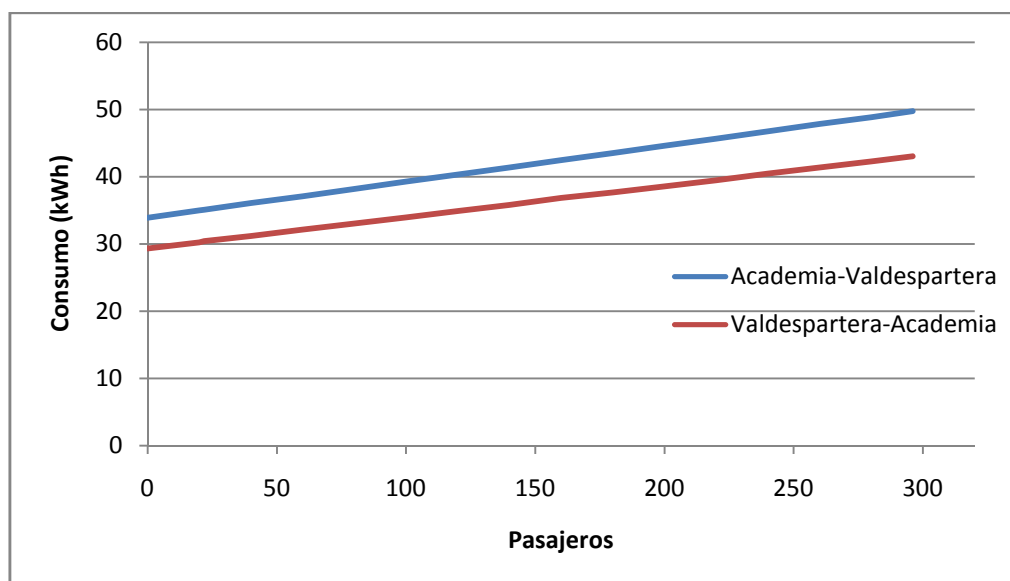


Gráfico 6. Consumo según número de pasajeros

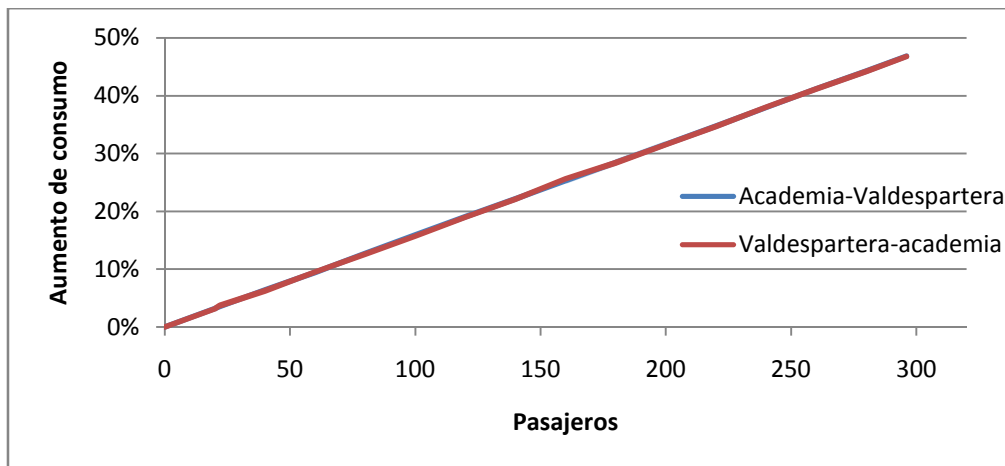


Gráfico 7. Variación porcentual del consumo según número de pasajeros

Analizando los datos se observa la gran influencia que tiene el aumento de pasajeros, idéntica en ambos sentidos, pudiendo llegar a aumentar el consumo casi un 50% cuando circula a plena capacidad. Conocer cómo afecta el número de viajeros en cada momento puede resultar muy importante para la recarga de las baterías. Prever cual va a ser el consumo en función de la ocupación puede determinar el tiempo necesario que el tranvía deberá permanecer en cada parada recargando.

De las tablas anteriores, también se extrae la conclusión de que el gasto energético es apreciablemente diferente para cada sentido. La velocidad y aceleración en cada instante puede influir pero la diferencia se debe fundamentalmente a que en un trayecto, el tranvía está más tiempo ascendiendo que descendiendo, ocurriendo lo contrario en el otro sentido.

Influencia de semáforos

El sistema de prioridad semafórica del tranvía, evita que tenga que detenerse en los cruces. Sin embargo, en ocasiones, se ve obligado a parar debido a algún obstáculo en la vía o porque el sistema no ha funcionado correctamente. Si esto ocurre, recargará energía en la frenada extra, pero también consumirá al volver a acelerar, siendo el balance negativo [13]. Para conocer cómo afecta esto, se ha estudiado un caso en el que el tranvía se detuvo en un semáforo. Los *Gráfico 8* y *Gráfico 9* y la *Tabla 4* muestran la diferencia entre el caso con semáforo y el caso sin él.

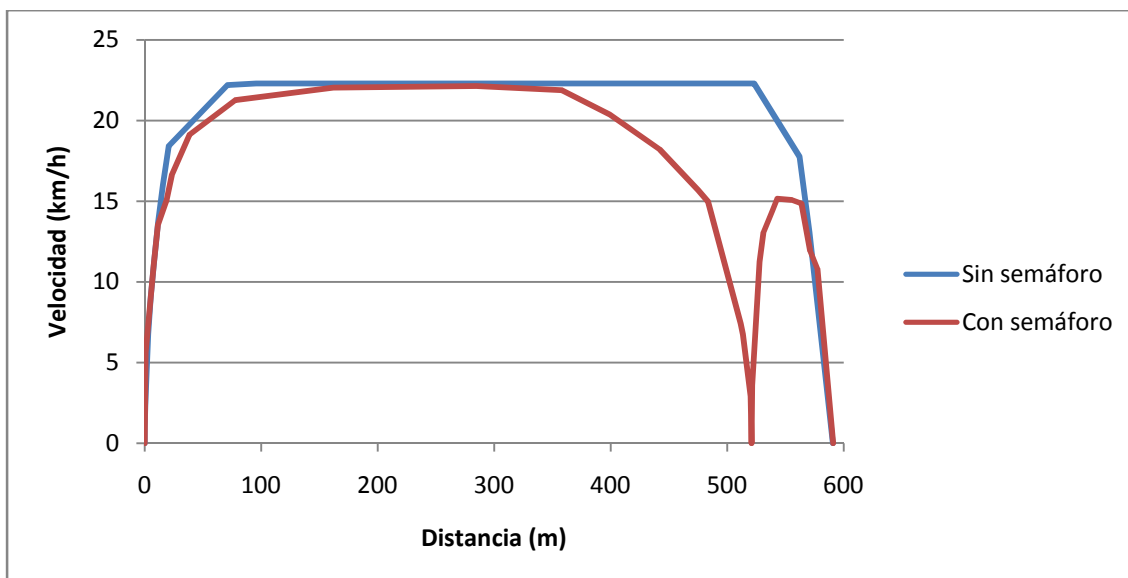


Gráfico 8. Curva de velocidad con y sin semáforo

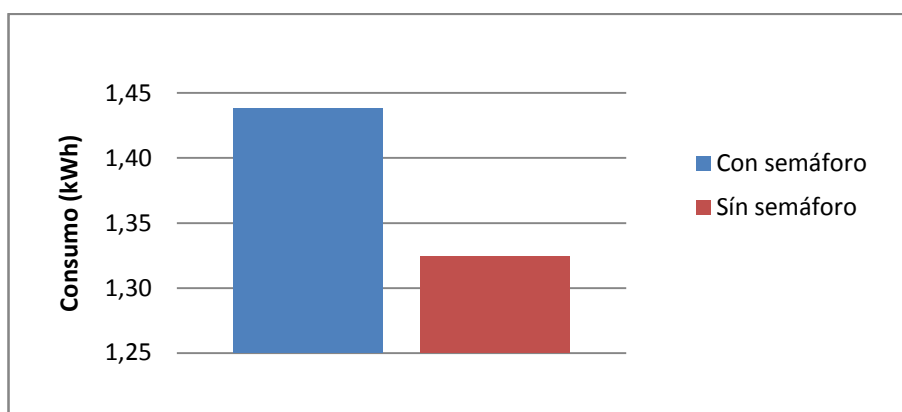


Gráfico 9. Diferencia consumo con y sin semáforo

	Consumo (kWh)	Consumo (kWh/km)
Con semáforo	1,438	2,437
Sin semáforo	1,324	2,244
Diferencia	0,114	0,193

Tabla 4. Diferencia consumo con y sin semáforo

El caso estudiado corresponde al trayecto entre las paradas “Cesar Augusto” y “Plaza España” con una distancia de 590 metros. Se aprecia que aun circulando a plena capacidad, el aumento de consumo es del 0,25% del total de la línea (46,385 kWh), lo que no es muy significativo. No obstante, la velocidad a la que circula en este tramo es más baja que durante el resto del trayecto por lo que el aumento de consumo es menor de lo que lo sería si ocurriese en otro momento. Debido a que no se dispone de más datos de paradas no programadas, se ha creado una situación de una supuesta parada en un semáforo. Los datos no son 100% reales por lo

que el resultado no será exacto aunque sí aproximado. El *Gráfico 10* , *Gráfico 11* y la *Tabla 5* muestran los resultados de dicho experimento.

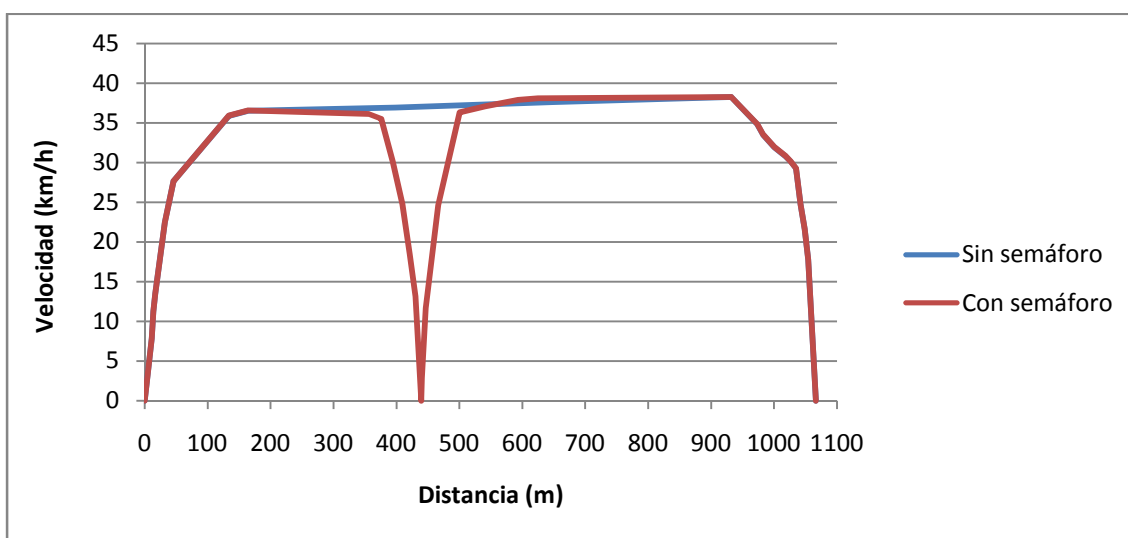


Gráfico 10. Curva velocidad con y sin semáforo (prueba)

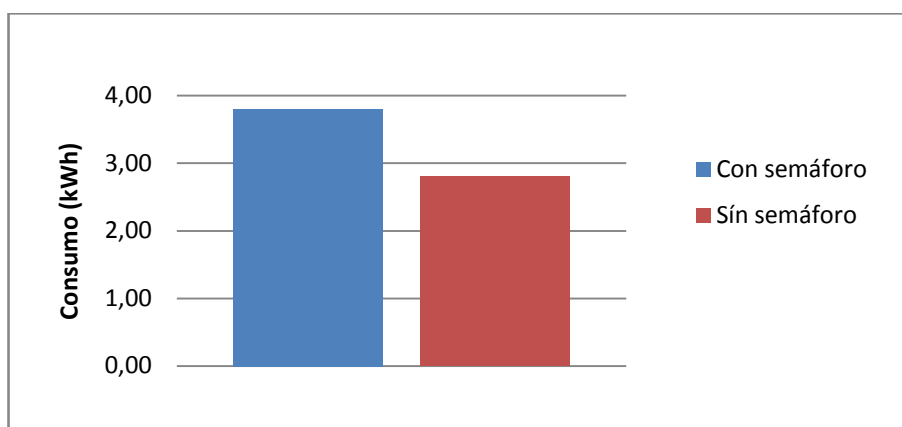


Gráfico 11. Diferencia consumo con y sin semáforo (prueba)

	Consumo (kWh)	Consumo (kWh/km)
Con semáforo	3.801	3.556
Sin semáforo	2.808	2.634
Diferencia	0,993	0,932

Tabla 5. Diferencia consumo con y sin semáforo (prueba)

En esta situación, correspondiente al tramo entre las paradas “Los Olvidados” y “Argualas” con una distancia de 1066 metros, se aprecia como el aumento de energía necesaria es considerablemente mayor. Considerando la velocidad máxima alcanzada entre cada dos paradas, se estima que el valor medio del consumo debido a una hipotética parada está en

torno a los 0,7 kWh. Esto supone un 1,5% del gasto medio en toda la línea (46,385 kWh). Dada la gran cantidad de semáforos que hay en Zaragoza, se puede asegurar que el sistema de prioridad semafórica permite al tranvía ahorrar una gran cantidad de energía.

Influencia del conductor

El mayor consumo de energía se produce durante la aceleración. Cuanto más brusca es, más energía es necesaria. Aunque los tiempos entre paradas son muy parecidos en todos los viajes, la forma de conducir de cada conductor, puede suponer un gasto extra, pero también un ahorro. Para cuantificar este valor, se ha comparado el consumo entre dos paradas según la curva de velocidad de dos viajes diferentes. Los resultados se muestran en el *Gráfico 12*, *Gráfico 13* y la *Tabla 6*.

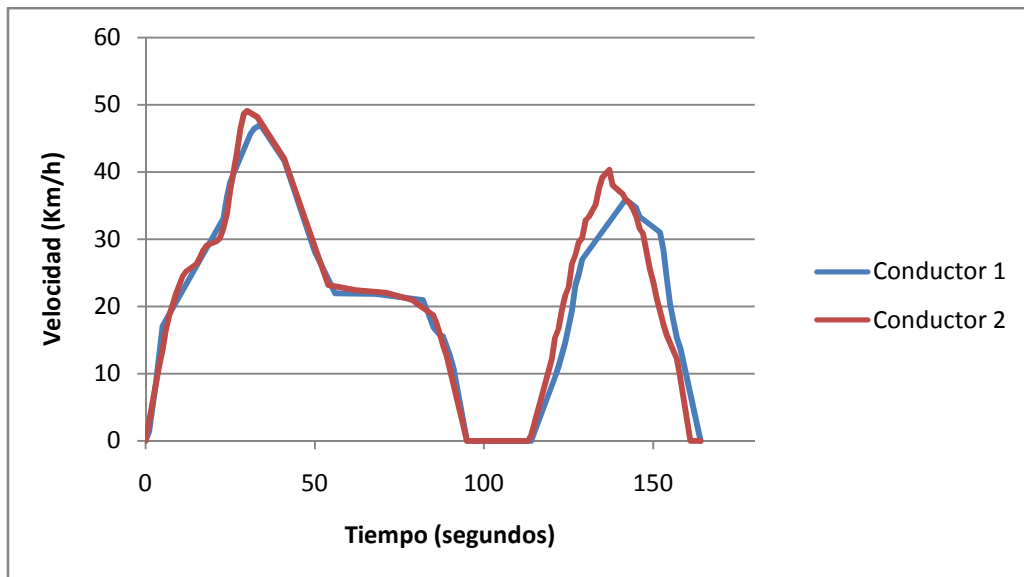


Gráfico 12. Curva de velocidad de diferentes conductores

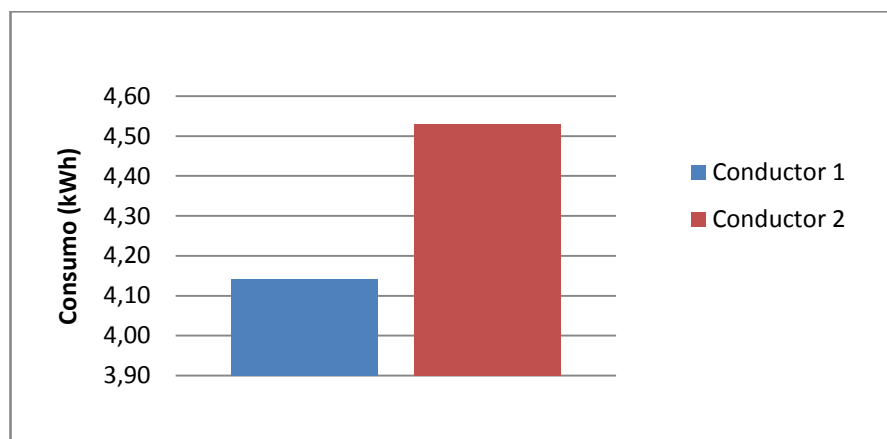


Gráfico 13. Diferencia de consumo entre conductores

	Consumo (kWh)	Consumo (kWh/km)
Conductor 1	4,142	4,214
Conductor 2	4,530	4,608
Diferencia	0,388	0,395

Tabla 6. Diferencia de consumo entre conductores

La comparación corresponde al trayecto entre las paradas “*Campus Rio Ebro*” y “*Legaz Lacambra*” con una longitud de 983 metros aproximadamente. La información de la que se dispone no es suficiente como para calcular un valor medio, aunque el aumento de consumo de casi un 10% de este estudio, demuestra la importancia de una conducción suave aunque ello suponga que se tarde un poco más en hacer el recorrido. A lo largo de toda la línea, estos gastos extra se irían compensando con ahorros en otros tramos, sin embargo, hay que tenerlos en cuenta ya que podrían comprometer el funcionamiento entre algunas paradas si las baterías no estuvieran suficientemente cargadas.

Hasta este punto no se ha considerado el consumo de los sistemas auxiliares. La forma en la que se utilicen, también puede tener un grave impacto en el valor final. Al no disponer de la información suficiente, no se ha analizado su efecto. Sin embargo, si se ha empleado un dato estándar extraído de la documentación de CAF y que se expondrá más adelante.

Viento

El viento puede influir notablemente en el consumo final, especialmente en una ciudad tan ventosa como Zaragoza. Un fuerte viento en contra supondría que el tranvía necesitaría más energía para desplazarse a la velocidad que lo hace, mientras que el viento a favor le ayudaría y haría que el consumo fuese menor.

Para conocer cuánto influye, se le ha dado un valor a la variable “*Vwind*” del modelo, la cual junto con la velocidad del tranvía, hará que la fuerza aerodinámica varíe. Debido a que no se disponía de herramientas para medir la velocidad y la dirección en cada momento, se han hecho dos estudios. En uno de ellos el viento será en contra en todo momento y en el otro a favor. Se ha utilizado un valor medio de 17 km/h, obtenido de las velocidades medias registradas durante cada mes a lo largo de un año y publicadas en la web del Ayuntamiento de Zaragoza [26]. Los resultados se muestran en el *Gráfico 14* y la *Tabla 7*.

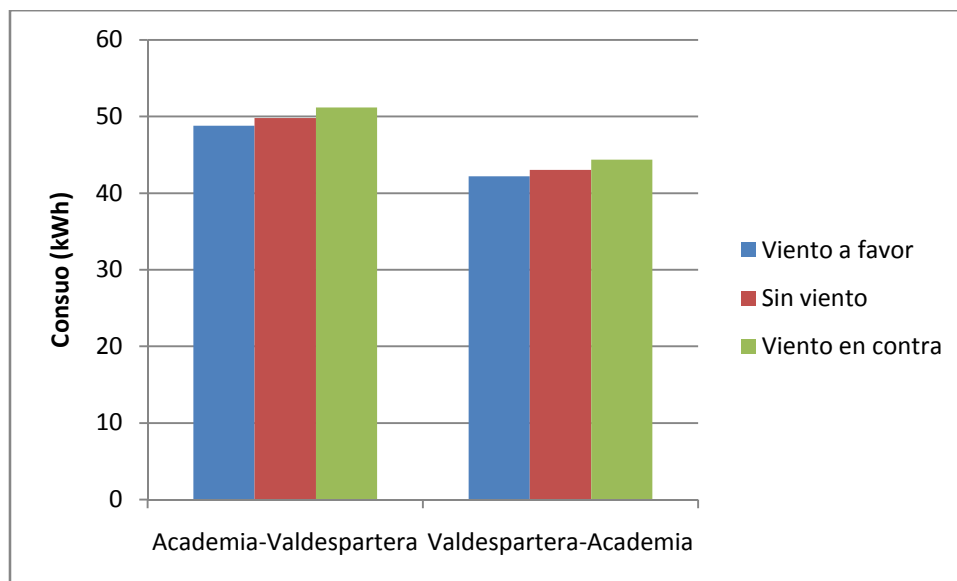


Gráfico 14. Diferencia de consumo con y sin viento

	Consumo Academia-Valdespartera (kWh)	Consumo Valdespartera-Academia (kWh/km)
Viento a favor	48,804	42,205
Sin viento	49,819	43,05
Viento en contra	51,166	44,385
Diferencia media	2,3%	2,5%

Tabla 7. Diferencia de consumo con y sin viento

Se observa que la influencia del viento no es muy significativa. Esto se debe a que la elevada masa del tranvía, hace que la fuerza de aceleración y la de resistencia a la rodadura, pesen más que la aerodinámica. El estudio se ha realizado suponiendo que el viento va siempre a favor o en contra. Esto en realidad no se cumple puesto que los giros que hace el tranvía harían que la dirección en la que incide en cada momento fuese distinta. Como consecuencia, la influencia se iría compensando siendo el resultado final real, menor al del estudio. Por ello, se ha desestimado la acción del viento para el resto del proyecto.

4.7. Comparación de resultados

En todas las simulaciones realizadas, se han utilizado datos obtenidos de diferentes fuentes, y fórmulas matemáticas para calcular el consumo. Debido a ello, los resultados son puramente teóricos. Al no tener acceso a herramientas que diesen resultados exactos, se han comprobado los obtenidos, con los de diferentes estudios similares, con el objetivo de analizar la fiabilidad de los cálculos realizados.

Anteriormente, se ha explicado que el frenado regenerativo y los sistemas de almacenamiento de energía pueden llevar a un ahorro del 40% en condiciones ideales. Sin embargo, el valor

medio es algo inferior. Se ha simulado el consumo del tranvía de Zaragoza con y sin frenado regenerativo, obteniendo los siguientes resultados:

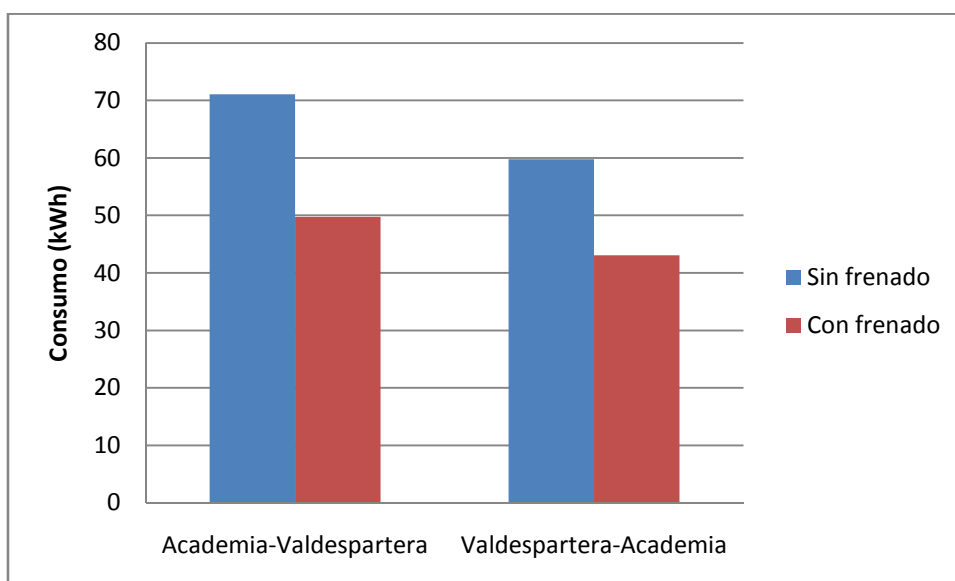


Gráfico 15. Ahorro energía con frenado regenerativo

	Academia-Valdespartera	Valdespartera-Academia
Sin frenado (kWh)	71,07	59,78
Con frenado (kWh)	49,73	43,04
Ahorro	30,03%	28.00%

Tabla 8. Ahorro energía con frenado regenerativo

El valor medio de ahorro resultante, es ligeramente inferior al 30%. Teniendo en cuenta que los datos empleados pertenecen a diferentes tranvías, que los cálculos son teóricos, y que una situación real será diferente a una ideal, se puede considerar que los resultados obtenidos son fiables.

La flecha de pérdidas expuesta en el funcionamiento de un tranvía mostraba que durante la circulación, estas podían llegar a ser de aproximadamente el 30% de la energía total consumida entre el motor, convertidores, transmisión, etc. Según los datos utilizados en este análisis, la eficiencia de todo el conjunto es del 69%, valor que se aproxima al de la flecha. En cuanto a las pérdidas durante el frenado, no se ha podido estudiar detalladamente cuántas son debido a cada elemento, ya que el dato de eficiencia de frenado regenerativo empleado ya las tiene en cuenta.

Estudio CIRCE

Se ha hecho una comparación con un estudio de movilidad urbana realizado por el “CIRCE” [12] con datos facilitados por el Ayuntamiento de Zaragoza. De acuerdo con este informe, la ocupación media del tranvía es de 21,93 pasajeros/km. En estas condiciones, según el informe, el consumo de energía es de 3,93 kWh/km.

Se ha considerado que a lo largo de los 12,67 km el tranvía se ha detenido en tres semáforos. Dado que las curvas utilizadas son la media de varios recorridos, no se ha utilizado el consumo referente a la diferencia de conductores aunque se tendrá en cuenta como parte de un margen de seguridad para dimensionar las baterías.

No se conoce en detalle el funcionamiento de los diferentes auxiliares del tranvía (luces, monitores, apertura de puertas...). Únicamente se sabe que incorpora dos equipos de aire acondicionado en sala y otros dos en cabina, con una potencia total de 39,8 kW en refrigeración. Al no conocer su rendimiento ni la forma en la que trabaja no se ha podido estimar su consumo. Por ello se ha utilizado un dato facilitado por CAF que cuantifica el consumo de los auxiliares es 29,9 kW, según una medición que realizaron en Junio de 2011. Recalculando los diferentes ensayos suponiendo que viajan 21,93 pasajeros, los resultados son los siguientes:

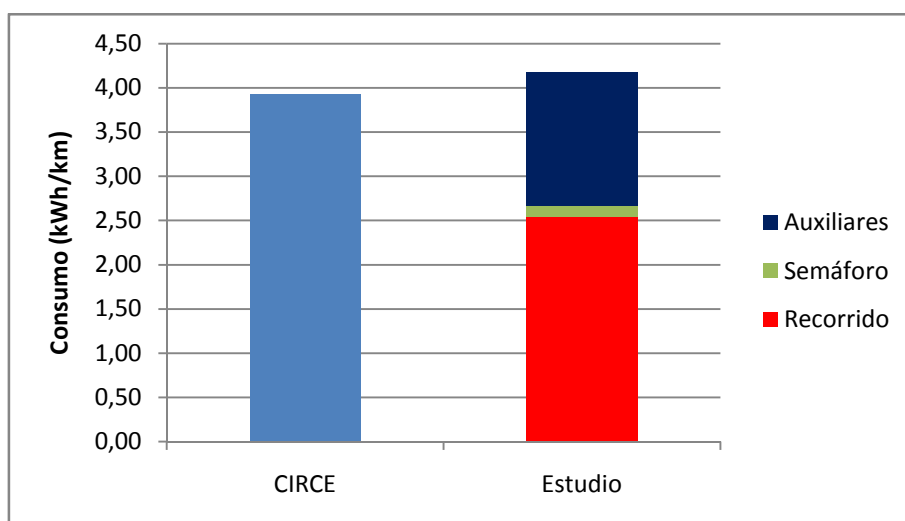


Gráfico 16. Comparación resultados estudio y CIRCE

	Consumo (kWh/km)
Recorrido	2,584
Semáforo	0,115
Auxiliares	1,51
TOTAL	4,209

Tabla 9. Consumo total con 21.93 pasajeros/km.

De esta manera, el gasto total de energía asciende a 4.21 kWh/km. Dado que se desconocen las condiciones en las que se ha medido el consumo en el informe del CIRCE, es difícil comparar los resultados, aunque existen diversas razones que pueden justificar la diferencia entre ellos:

- Algunos de los datos utilizados son del modelo T3000 de Bombardier. Este tranvía se introdujo en Bruselas en 2005. El tranvía de Zaragoza es más reciente por lo que existe la posibilidad de que tenga una tecnología más avanzada y sea más eficiente (menores pérdidas en los convertidores, menos rozamiento de la cadena de transmisión...). Si se conocieran todos los parámetros del de Zaragoza, el resultado se aproximaría más al real.
- El dato referente al consumo de auxiliares corresponde al mes de Junio de 2011. Este mes no fue muy caluroso por lo que el sistema de aire acondicionado probablemente no funcionaba a plena potencia. Durante los meses de Julio y Agosto este dato puede ser mayor, aunque durante el resto del año es posible que sea menor si no se utiliza ningún equipo de climatización, o se usa la calefacción, cuyo consumo es menor. Debido a ello, el gasto medio de todo el año sería ligeramente inferior al utilizado en los cálculos.
- En la medición de la curva de velocidad, se han podido cometer errores como consecuencia de la falta de exactitud del GPS y los ajustes manuales realizados. Una curva más exacta con unas aceleraciones más continuas y suaves supondrían menos gasto energético. Estas se podrían obtener con un sistema conectado a la cadena de transmisión que proporcionase la velocidad real en cada instante.
- Como se ha explicado, la curva de altura calculada es aproximada. En algunos puntos, la pendiente es mayor de lo que sería un valor razonable. Debido a ello, parte de la fuerza de ascensión necesaria puede resultar mayor de la real.
- Se ha considerado que el tranvía ha efectuado tres paradas no programadas como margen de seguridad. Sin embargo, es probable que solo ocurra una o ninguna vez, lo que haría que el consumo total fuese menor.

4.8. Conclusiones

- El consumo medio del tranvía en lo que a tracción se refiere es de 46,385 kWh. En el sentido Academia - Valdespartera consume más que en el contrario (49,73 kWh frente a 43,04 kWh) (*Tabla 2* y *Tabla 3*) debido al perfil de pendiente, siendo el de mayor consumo mayoritariamente ascendente mientras el otro es descendente). A plena capacidad por tanto el consumo es de 3,661 kWh/km, valor relativamente bajo, lo que demuestra la gran eficiencia del tranvía.
- El peso juega un papel muy importante en el consumo final. Un gran aumento de este cómo por ejemplo cuando circula a plena capacidad de pasajeros puede suponer un

gasto energético casi un 50% mayor que cuando circula vacío (*Gráfico 7*). Por ello, resulta importante conocer cuántos pasajeros viajan en cada momento para estimar cual será el consumo y de esta manera determinar el tiempo que deberá permanecer recargando las baterías.

- Cada vez que el tranvía se ve obligado a parar en un semáforo, la posterior aceleración conlleva un gasto extra significativo (*Gráfico 11 y Tabla 5*). En una ciudad como Zaragoza con una densidad de semáforos tan elevada, el sistema de prioridad semaforica que permite que no tenga que detenerse en ningún cruce resulta muy efectivo para ahorrar energía.
- La forma de conducir del conductor puede influir de manera considerable en el consumo total (*Tabla 6 y Gráfico 13*). Aunque los gastos extra por una aceleración más brusca se compensarían con ahorros en otra parte del recorrido, una conducción suave resulta de gran importancia a fin de no comprometer el funcionamiento entre paradas, especialmente al final de la línea donde el estado de carga de las baterías podría estar muy bajo.
- Para un vehículo de pequeñas dimensiones, el viento puede tener un gran impacto en la resistencia aerodinámica. Sin embargo, en el tranvía, aunque un viento constante de 17 km/h llega casi a doblar el gasto referente a esta resistencia (la velocidad media de circulación es de 20 km/h), el resto de fuerzas que ha de vencer tienen mayor efecto. Por ello, el efecto del viento resulta casi inapreciable, aumentando el consumo final menos de un 3% (*Gráfico 14 y Tabla 7*).
- El sistema de frenado regenerativo implica un ahorro de energía cercano al 30% (*Gráfico 15 y Tabla 8*). Esto demuestra la importancia del sistema y cómo desarrollar y mejorar la tecnología que utiliza para que se aproveche mejor la energía de frenado resultaría muy beneficioso.
- El consumo del motor no es el único que tiene el tranvía. Los diferentes sistemas auxiliares (climatización, luces, apertura de puertas...) también suponen un elevado gasto (1,51 kWh/km frente a los 3,66 kWh/km del motor) (*Gráfico 16. Comparación resultados estudio y CIRCE y Tabla 9*). Minimizar su uso a únicamente cuando sea necesario, especialmente el aire acondicionado, resulta muy importante para ahorrar energía.

5. CARGA DE BATERÍAS

Anteriormente se han explicado los beneficios de usar sistemas de almacenamiento de energía. Estos permiten aprovechar mejor la recuperada con el ahorro que ello supone, y eliminar las poco atractivas catenarias. Sin embargo, unas baterías con la suficiente capacidad para realizar un trayecto completo, resultan muy pesadas dado su gran tamaño.

Con el objetivo de reducirlo, diferentes empresas han desarrollado sistemas de carga sin cable que utilizan para recargar las baterías de sus autobuses eléctricos o tranvías. Estos permiten aumentar las oportunidades de carga. Al no utilizar cable, se pueden instalar las estaciones de carga en cualquier parada de manera que cuando el vehículo se detiene encima, las baterías se recargan automáticamente por inducción. También es posible colocarlas a lo largo del recorrido de tal manera que cuando el tranvía pase por encima, el sistema se conecte. Debido a ello, se pueden utilizar baterías de menor tamaño [3], [2]. El ahorro en peso y tamaño que ello conlleva no son las únicas ventajas. Como el sistema va enterrado en el suelo, es más seguro, al evitar electrocuciones a peatones que pasen por encima y está mejor protegido frente a actos de vandalismo. Además, los costes de mantenimiento son menores, así como el coste de algunas infraestructuras ya que si el tranvía tuviese que atravesar un túnel, este podría ser más pequeño al no tener que poner catenaria [6].

A continuación se explica el funcionamiento de la carga por inducción y se presentan algunos casos en los que actualmente se utiliza este sistema. Posteriormente se presenta un estado del arte de los sistemas de almacenamiento de energía más utilizados en la actualidad así como sus configuraciones más comunes. Finalmente se muestra el método de cálculo empleado y los resultados obtenidos del estudio aplicado al tranvía de Zaragoza según diferentes situaciones de carga. En ellos se demuestra la posible reducción de tamaño de baterías anteriormente comentada.

5.1. Funcionamiento y estado del arte de la carga por inducción

La inducción se basa en las leyes de Ampere y Faraday para transmitir potencia sin utilizar cables. El sistema consta principalmente de dos espiras. Una de ellas, llamada primaria está conectada a la red eléctrica. Al circular corriente por ella, se induce un campo magnético circular (Ampere). Este campo circula alrededor de la segunda espira, lo que hace que en ella se induzca una corriente (Faraday). La Figura 5 [3] muestra un esquema de cómo funciona.

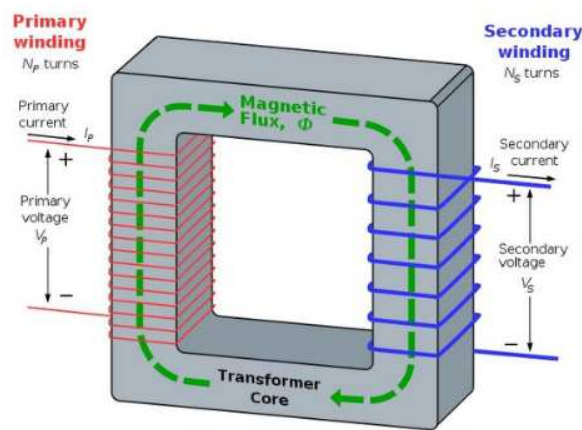


Figura 5. Transmisión de potencia sin cable

El funcionamiento es muy similar al de un transformador eléctrico pero con una notable diferencia. En el transformador, el campo se transmite a través de un núcleo de material magnético, generalmente hierro o ferrita. En la carga por inducción lo hace a través del aire. Debido a ello, para conseguir una buena eficiencia, ambas espiras han de estar perfectamente alineadas y el espacio entre ellas debe ser el mínimo posible [3], [5].

Dependiendo de qué componente del flujo recoja la espira secundaria, se distinguen dos tipos de sistemas: de captura tangencial u horizontal y de captura normal o vertical

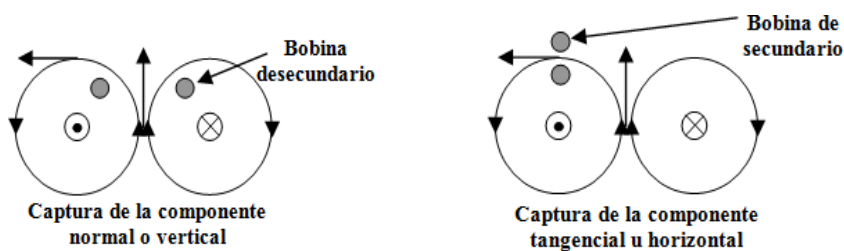


Figura 6. Sistemas de captura del flujo magnético

Según la componente que capture, la espira secundaria tendrá una orientación u otra y dependiendo de la alineación con la primaria, captará mas flujo o menos. Si la componente capturada es la vertical, cuando las espiras estén alineadas el flujo captado será máximo, disminuyendo a medida que se desalinean. Si se captura la componente horizontal el comportamiento es el contrario. La *Figura 7*, muestra cómo es el flujo capturado en cada caso, y cómo un sistema capaz de capturar ambas componentes, es más estable frente a desalineamientos.

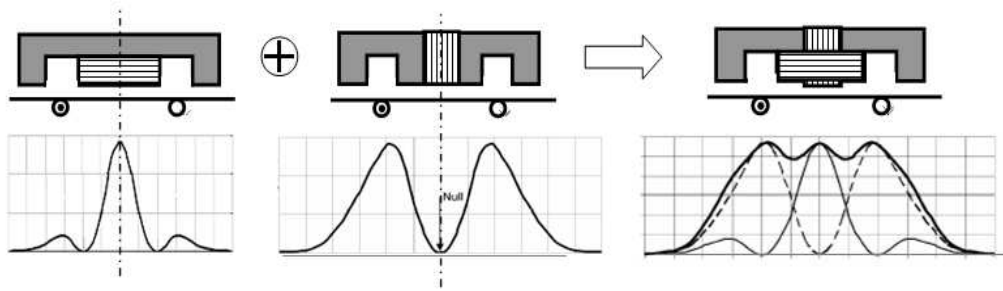


Figura 7. Flujo capturado por cada sistema

Además, para cumplir con la normativa "*ICNIRP-2010*" (International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection) que determina el máximo campo magnético al que puede estar expuesta una persona, es posible que sea necesario colocar a su alrededor un material de alta conductividad y reducida permeabilidad magnética que haga de escudo y evite la radiación [21]. La *Figura 8* [6] muestra un esquema de este concepto aplicado a un tranvía.

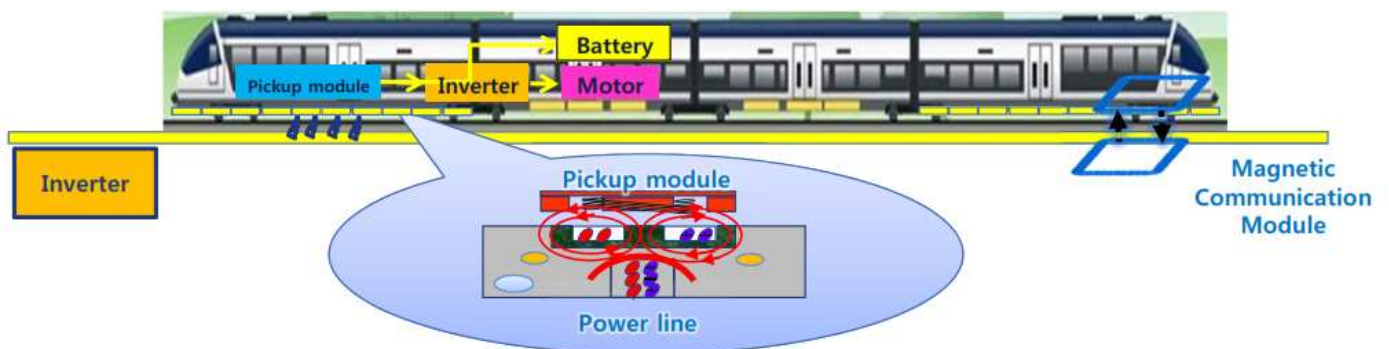


Figura 8. Esquema carga inductiva de un tranvía

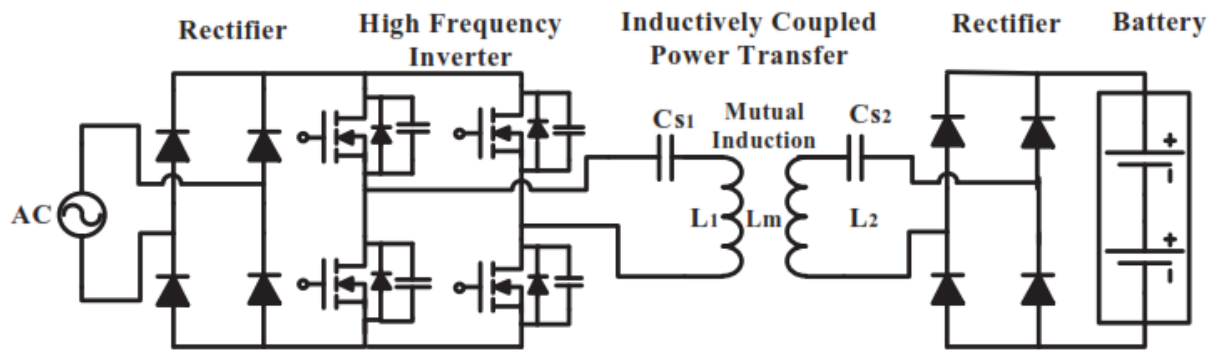


Figura 9. Esquema sistema carga inductiva [7]

En la *Figura 9* se muestra el esquema típico de un sistema de carga por inducción. La corriente procedente de la red, pasa por un rectificador en el que la corriente alterna se transforma en continua. Después, un inversor la transforma de nuevo en alterna alimentando a la espira del primario con una onda cuadrado de alta frecuencia. Después circula por la espira primaria, la cual va enterrada en el suelo por razones de seguridad (*Figura 10*). Cuando el tranvía se detiene encima, el sistema lo detecta y se conecta. Entonces empieza a fluir un campo magnético que al circular alrededor de la espira secundaria, situada bajo el tranvía (*Figura 11*), induce una corriente alterna. Esta pasa de nuevo por un rectificador que la convierte en continua para finalmente cargar la batería.



Figura 10. Espira primaria



Figura 11. Espira secundaria

La separación de aire entre la espira primaria y la secundaria llevan a una baja inductancia mutua lo que reduce el voltaje, creando un desfase entre este y la corriente, lo que hace que aparezca potencia reactiva [7]. Esto unido a las pérdidas del inversor por las elevadas frecuencias de trabajo (mayores de 25 kHz) [21] hace que la potencia transferida sea menor. Para subsanar este problema, se usan condensadores que trabajan en resonancia con el resto del sistema para reducir las pérdidas.

Existen diferentes topologías, según la configuración de estos condensadores:

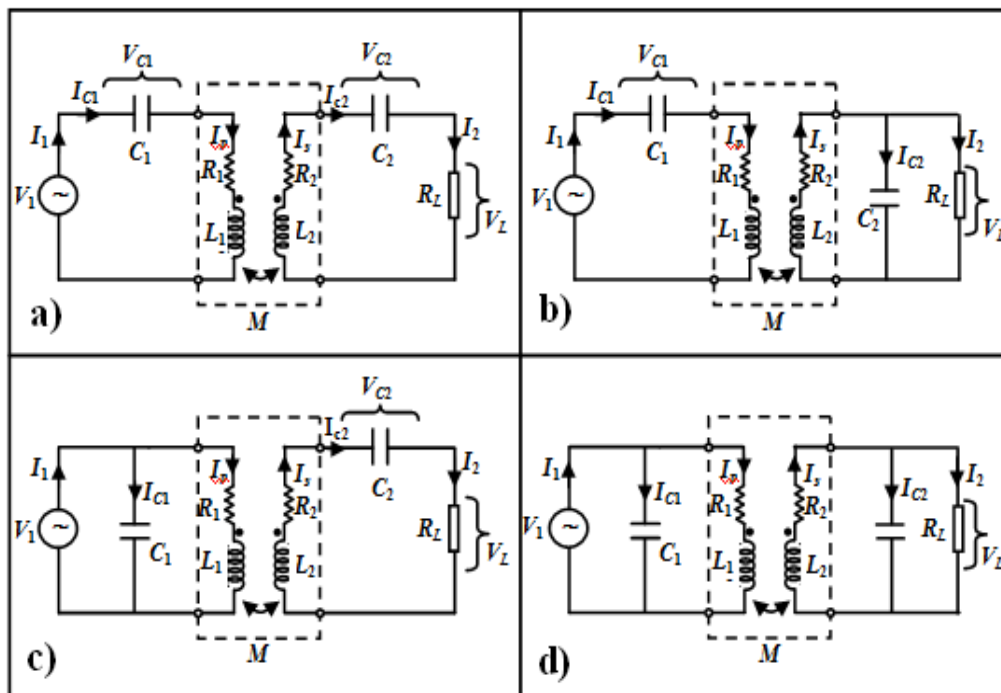


Figura 12. Topologías sistema carga inductiva [11]

a) Serie-Serie b) Serie-Paralelo c) Paralelo-Serie d) Paralelo-Paralelo

En función de la aplicación para la que se desea usar, unas topologías son más apropiadas que otras. Aquellas con una configuración del primario en serie pueden transferir mayores potencias, sin embargo, su comportamiento resulta inestable cuando la espira secundaria está desalineada, aumentando drásticamente la corriente y la potencia, pudiendo incluso llegar a dañar la fuente. Por el contrario, en las topologías con una configuración paralela del primario la frecuencia máxima de operación es menor, pero su comportamiento frente a un desalineamiento de las espiras, es más estable, reduciéndose la potencia cuanto mayor es [11].

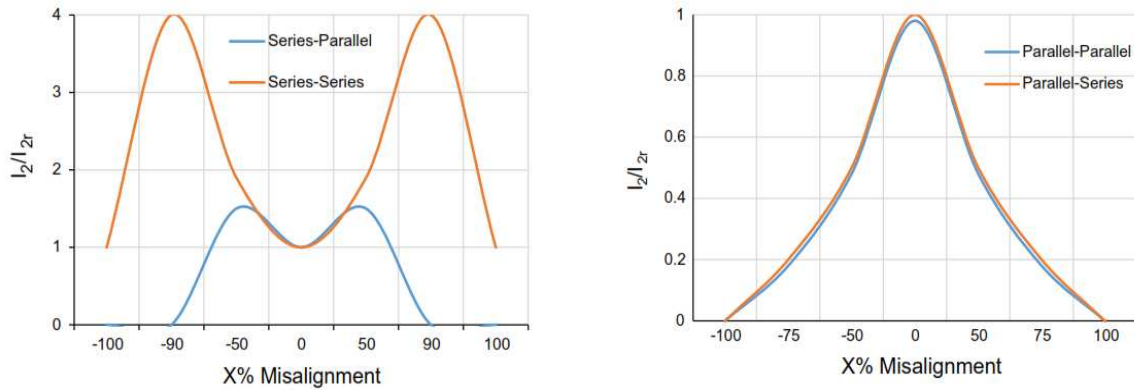


Figura 13. Comportamiento frente a desalineamiento [7]

De acuerdo a diferentes estudios [7], [11], la topología más adecuada para la carga de un vehículo eléctrico es la Serie-Serie.

Además de las topologías mostradas, existen variaciones de estas en dónde en un mismo lado se combinan la configuración serie y paralelo. De acuerdo con [21] la topología Serie-Paralelo-Serie (patentada por CIRCE), tiene un mejor rendimiento cuando hay variaciones de alineación, distancia y voltaje en la batería.

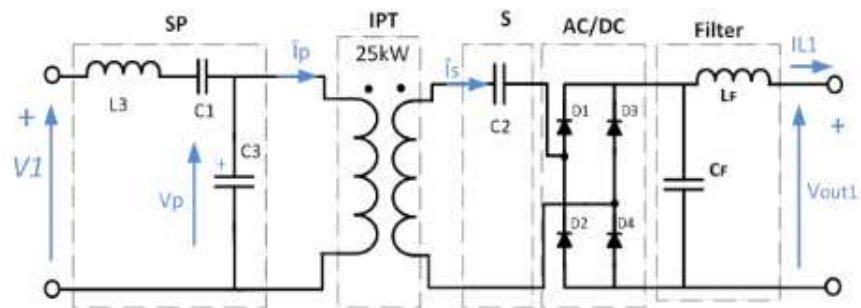


Figura 14. Topología Serie-Paralelo-Serie

El primer coche eléctrico en utilizar carga sin cable data de 1998. La empresa que lo hizo, "Wampfler" (actualmente IPT Technology) sacó años después, en 2002, el primer autobús eléctrico capaz de recargarse en una parada sin utilizar cables [3]. Desde entonces, esta y otras empresas han ido evolucionando esta tecnología y sacando nuevas versiones de sus autobuses hasta alcanzar eficiencias superiores al 80% y en algunos casos hasta del 90% [3], [2], [5]. Entre los avances conseguidos, cabe mencionar un sistema desarrollado y patentado por la colaboración de las empresas "Bombardier", "Viseon Bus" y "GmbH", en el que al posicionarse la espira secundaria sobre la primaria, un mecanismo la baja para reducir la distancia entre ellas y así mejorar la eficiencia.

Durante la última década, muchos países han utilizado autobuses con carga por inducción, la mayoría de ellos en Europa y Asia. Sin embargo, no ha sido hasta hace poco cuando esta tecnología se ha empezado a aplicar a tranvías y trenes. Desde 2009, "Siemens" ha desarrollado productos capaces de almacenar energía en movimiento y utilizarla para propulsar un tranvía durante 1,5 millas sin usar catenaria. En 2011, Bombardier presentó en la EXPO de Nueva Orleans su sistema "PRIMOVE IPT", probado por primera vez en Augsburg en 2009. Es capaz de suministrar potencias de entre 100 kW y 500 kW lo que permite a un tranvía subir pendientes de hasta el 6% y alcanzar velocidades superiores a los 70 Km/h. Aunque no es estrictamente inducción, "Alstom" tiene un sistema en el cual la electricidad circula por espiras situadas a lo largo de un tercer raíl enterrado en el suelo. Únicamente al entrar en contacto con las espiras del tranvía se activan evitando así posibles electrocuciones [3]. CIRCE por su parte ha presentado el sistema de inducción de 50 kW tanto para carga estática, estática en ruta y dinámica en los proyectos Unplugged y Victoria. La primera equivale a una carga conductiva rápida de varios minutos tipo CHAdemo o COMBO, la segunda permite la carga en breves paradas, por ejemplo durante la subida de los pasajeros al autobús o en los tiempos de parada en un semáforo y la tercera permite la carga mientras se circula.

5.2. Estado del arte de sistemas de almacenamiento

La gestión de la energía y el tamaño de los sistemas de almacenamiento, afectan en gran medida al rendimiento y autonomía de un vehículo eléctrico. Cualquiera que utilice tracción eléctrica en mayor o menor medida requiere unas baterías con un extenso ciclo de vida. Además, en los puramente eléctricos, como el tranvía, estas están sometidas a un gran estrés al utilizarse un mayor porcentaje de la energía almacenada y estar sometidas a un mayor número de ciclos de carga-descarga. Por tanto, la eficiencia del vehículo depende de la capacidad del sistema de almacenar grandes cantidades de energía y de responder a sus necesidades, siendo capaz de entregarla rápidamente si el vehículo así lo demanda [15].

Las características más importantes del sistema de almacenamiento de un vehículo eléctrico son alta densidad de energía, elevada densidad de potencia, extensos ciclos de vida y costes reducidos. Para poder satisfacer estas necesidades se opta mayoritariamente por sistemas híbridos de baterías y ultracondensadores. Las baterías tienen una elevada densidad de energía y pueden almacenar la mayoría de esta, mientras los condensadores destacan por su gran densidad de potencia, extensos ciclos de vida y rápida respuesta a la carga y descarga [8] Existen también algunas aplicaciones en las que se utilizan células de combustible, sin embargo, dado que el tranvía de Zaragoza usa baterías y ultracondensadores, el estudio se centrará en este tipo.

A continuación se explican las características más importantes de las baterías y se comparan los tipos más utilizados.

Baterías

Las baterías son el sistema de almacenamiento de energía más utilizado para vehículos eléctricos dado su bajo coste y fácil portabilidad. Producen electricidad descargando la energía almacenada en los productos químicos que incorporan. Consisten en un electrolito, dos electrodos (positivo y negativo) de diferente material y un separador entre ellos. Los electrodos reaccionan químicamente con el electrolito produciendo energía.

Las características más importantes en aplicaciones de movilidad son ciclo de vida, potencia específica, energía específica, coste y seguridad. En la *Figura 15* [10] se representan estas características para diferentes tipos de baterías.

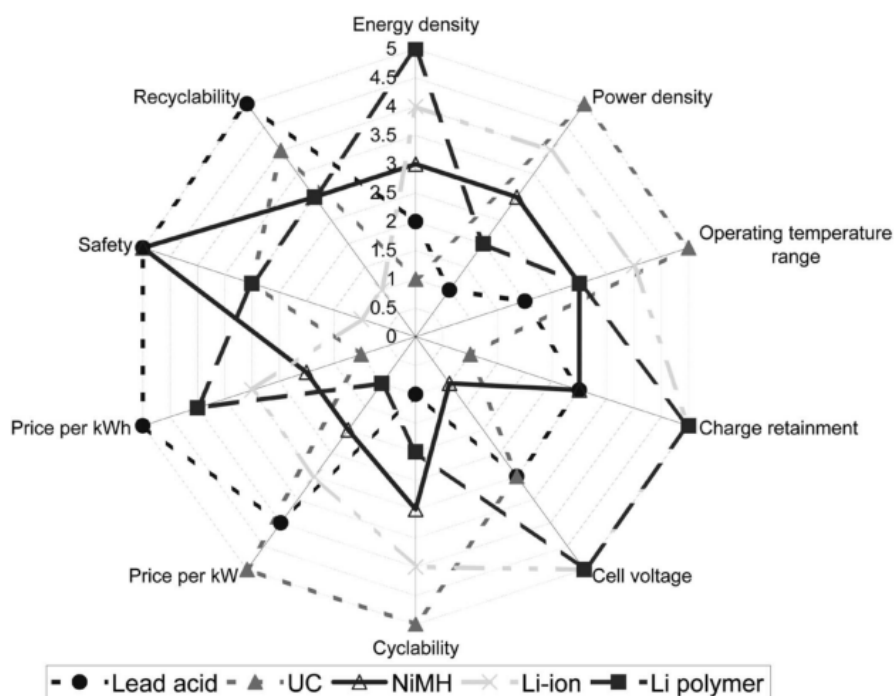


Figura 15. Características de diferentes baterías

- **Plomo ácido**

Formadas por placas positivas de dióxido de plomo y negativas de plomo esponjoso sumergidas en una disolución de ácido sulfúrico que actúa como electrolito. Para evitar el contacto entre las placas, dispone de separadores aislantes resistentes al ácido y que permiten la circulación de este entre las placas. Durante la descarga, el material tanto de las placas positivas como de las negativas se convierte en sulfato de plomo.

Actualmente es el tipo más utilizado como batería convencional de un vehículo. Como se muestra en la *Figura 15* resultan muy baratas, lo que se debe a la madurez de la tecnología al llevarse utilizando y mejorando durante más de 50 años. Como aspecto negativo destaca su

baja densidad de energía, debida fundamentalmente al elevado peso del plomo. Su densidad de potencia es también muy reducida. Esta se podría mejorar aumentando la superficie de los electrodos, sin embargo, también aumenta la corrosión, lo que reduce el ciclo de vida. Además si no se recarga completamente periódicamente, se forman cristales, que reducen la porosidad de los electrodos reduciendo la capacidad total de la batería. Sus características técnicas oscilan alrededor de los siguientes valores:

-Densidad de energía: 33-42 Wh/kg.

-Densidad de potencia: 180 W/kg.

-Durabilidad: 500-800 ciclos.

Su reducido ciclo de vida hace que no sea una batería muy apropiada para vehículos de tracción puramente eléctrica, limitándose su uso a los vehículos convencionales para arrancar el motor y alimentar los sistemas auxiliares.

- **Níquel Metal Hidruro (NiMH)**

Formadas por un electrodo positivo de hidróxido de níquel, y una aleación de diferentes metales, como vanadio, titanio y níquel entre otros como cátodo. Una solución alcalina actúa como electrolito. Se pueden reciclar dado que sus materiales no son dañinos para el medio ambiente, cómo si lo eran las de Níquel-Cadmio, a partir de las cuales se han desarrollado.

Durante los últimos 15 años, se han desarrollado hasta alcanzar una densidad de energía de aproximadamente el doble que las de plomo ácido. Tienen también un mayor ciclo de vida y densidad de potencia, excelentes propiedades térmicas y son resistentes a los ciclos de carga y descarga aunque si se descargan repetidamente a elevadas corrientes, su durabilidad se ve reducida. El mayor aspecto negativo es precio, consecuencia del elevado coste de sus materiales. Sus principales características técnicas son:

-Densidad de energía: 75-100 Wh/kg.

-Densidad de potencia: 250 W/kg.

-Durabilidad: 500-1000 ciclos.

Sus buenas densidades de energía y potencia, así como su durabilidad son las razones por las que muchos vehículos híbridos, como la primera versión del Toyota Prius, el Honda Insight o el Honda Civic las empleaban para alimentar el motor eléctrico que complementaba al térmico. Algunos vehículos puramente eléctricos como el Honda EV Plus o el Ford Ranger EV también las emplean. El tranvía de Zaragoza, utiliza este tipo de baterías.

- **Ión-Litio**

El ánodo está hecho de óxido de cobalto y el cátodo de material de carbono. Para el electrolito se utiliza sal de litio. Tienen poco efecto memoria y el hecho de que sus procesos internos son más simples que los de otras reacciones químicas, permite hacer modelos informáticos para aumentar su rendimiento e incluso estimar su deterioro.

Al igual que las baterías de Níquel Metal Hidruro, las de Ión Litio tienen buen rendimiento a elevadas temperaturas y también son reciclables. Su densidad de potencia y de energía son mayores y tienen un ciclo de vida similar. Como aspectos negativos destacan su elevado coste y su seguridad, pudiendo inflamarse e incluso explotar si la temperatura son extremas. Sus principales características técnicas son:

- Densidad de energía: 100-200 Wh/kg.
- Densidad de potencia: 200-300 W/kg.
- Durabilidad: 400-2000 ciclos.

El precio de las baterías de Níquel Metal Hidruro está aumentando debido al cada vez mayor coste del níquel. Esto unido a las excelentes densidades de energía y potencia de las Ión-Litio, está llevando a la industria a sustituir las baterías de los coches híbridos por estas últimas. Los últimos modelos híbridos de Toyota y otros eléctricos como el Nissan Leaf o el Tesla Model S ya las montan. Además, su cada vez mayor utilización para aplicaciones de movilidad está haciendo que su precio vaya bajando.

Ultracondensadores

Los ultracondensadores almacenan la energía separando físicamente las cargas de distinto signo. Estas se almacenan en dos placas paralelas divididas por un separador. Al no tener lugar reacciones químicas en los electrodos, la durabilidad de un ultracondensador es mucho mayor que la de una batería, pero su densidad de energía es mucho menor. La *Figura 16 [8]* muestra el esquema de un ultracondensador.

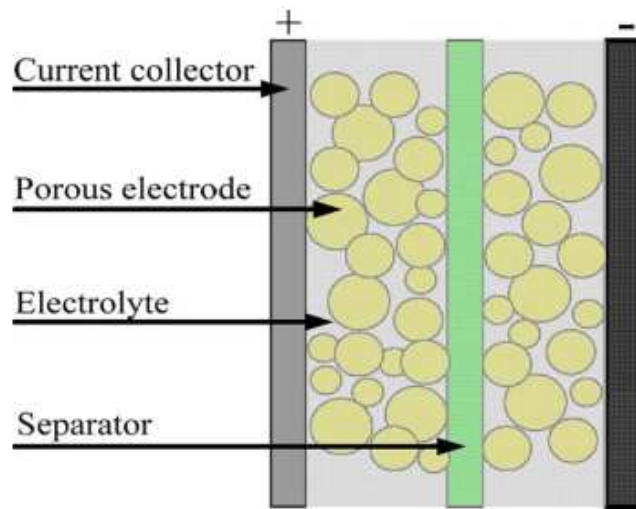


Figura 16. Esquema de un ultracondensador

La capacidad de almacenamiento es proporcional al área de los electrodos y a la permeabilidad del separador dieléctrico e inversamente proporcional a la distancia entre las placas. Por ello, las investigaciones en ultracondensadores se centran en desarrollar métodos que permitan aumentar el área de contacto sin aumentar su tamaño.

Un vehículo eléctrico realiza muchas paradas y arranques circulando por la ciudad. Los ultracondensadores resultan muy adecuados para complementar a las baterías maximizando los beneficios de ambos componentes. Son capaces de entregar potencia de forma rápida para una aceleración y son muy apropiados para recuperar energía del frenado regenerativo. De esta forma, al combinarse con baterías, se maximizan los beneficios de ambos componentes.

Combinación

Existen diferentes topologías de conexión de ambos sistemas de almacenamiento que comparten el objetivo de combinar eficientemente la respuesta rápida con altas densidades de potencia y respuesta lenta con altas densidades de energía.

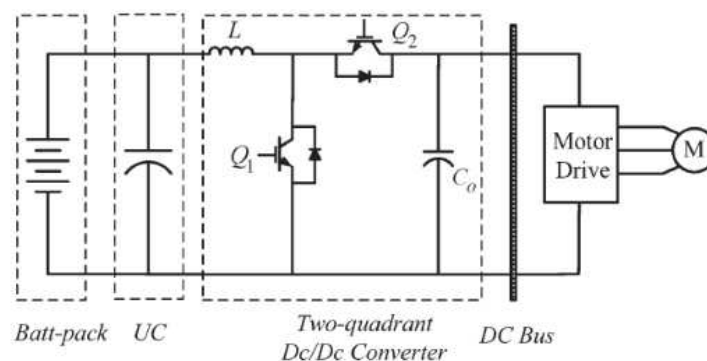


Figura 17. Configuración UC/Batería en cascada pasiva

En la configuración de la *Figura 17* [8] un convertidor DC/DC bidireccional se encuentra entre el ultracondensador y la línea dc (DC Link en la *Figura 1*) que eleva el bajo voltaje del condensador al de la línea de corriente continua. Aunque el condensador sufra variaciones de voltaje al descargarse, estas son reguladas por el convertidor, manteniendo siempre el mismo voltaje en la línea dc. Sin embargo, el voltaje de la batería es el mismo al del ultracondensador. La corriente de esta lo carga para entregar potencia cuando es necesario. Este problema se soluciona con la introducción de otro convertidor entre ambos sistemas de almacenamiento, como se muestra en la *Figura 18* [8].

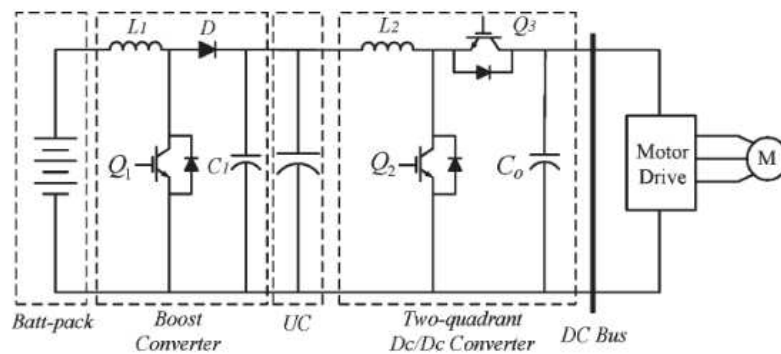


Figura 18. Configuración UC/Batería en cascada activa

La presencia de un convertidor a la salida de la batería que eleve el voltaje, permite que el de esta sea menor y con ello su tamaño. La menor corriente, supone un menor estrés para la batería, lo que alarga su ciclo de vida. Si el convertidor es unidireccional, como el de la figura, la batería no se puede cargar por frenado regenerativo ni por el condensador, teniéndose que conectar a la red para cargarse. Esto se soluciona con un convertidor bidireccional, pero su coste es mayor.

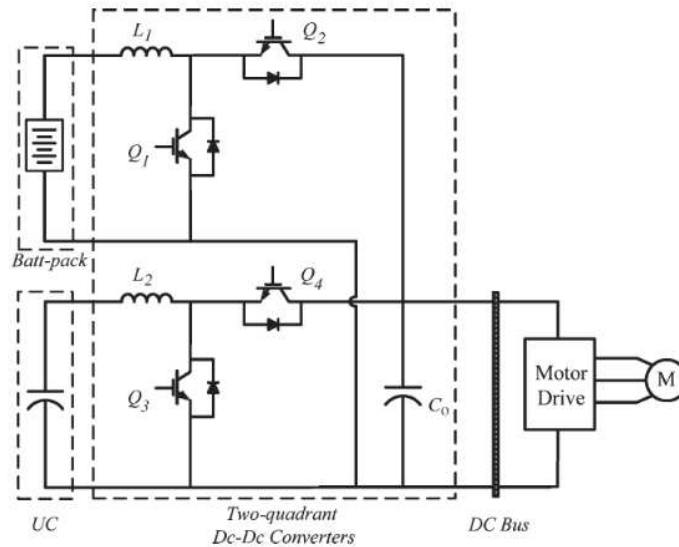


Figura 19. Configuración UC/Batería en paralelo

En la configuración en paralelo de la *Figura 19* [8] tanto la batería como el ultracondensador están conectados con la línea de corriente continua a través de un convertidor bidireccional cada uno. El voltaje de ambos es menor al de la línea, y este es elevado cuando hay una demanda de energía. La conexión en paralelo permite el funcionamiento independiente de ambos sistemas.

El diseño de qué cantidad de energía debe almacenar la batería y cuánta el condensador, requiere un complejo y extenso estudio con una importante carga de cálculo matemático [15]. Esto no se ha podido realizar por lo que aunque el tranvía de Zaragoza tiene un sistema híbrido de baterías y ultracondensadores, a partir de aquí se referirá como capacidad de la batería, a la capacidad total que debería tener el sistema.

5.3. Modelo de cálculo

Para ensayar diferentes situaciones de carga de baterías y estimar el tamaño de estas, se ha hecho una ampliación del modelo de Matlab/Simulink anterior. Se han creado diferentes curvas que representan la potencia de carga y la duración de la misma con diferentes valores (200 kW, 300 kW, diferente tiempo en cada parada, mismo tiempo en todas...).

- Carga durante la noche en cocheras.
- Carga en los extremos de la línea después de cada recorrido.
- Carga en las paradas durante el tiempo que permanece estacionado.
- Carga en las paradas durante un tiempo fijo e igual en todas ellas.
- Optimización.

En todos los ensayos se han utilizado los mismos criterios. La eficiencia de carga se ha supuesto del 90% al ser un valor que la tecnología actual es capaz de alcanzar. A excepción del primer viaje de cada día, cuando las baterías estarán completamente cargadas, en el resto se considerará que el estado de carga al principio de cada uno será del 95%. Esto se hace para dejar un margen de carga para un posible frenado regenerativo al inicio del viaje y como margen de seguridad para evitar que la batería se sobrecargue. Para no dañar en exceso las baterías, normalmente se establece como valor mínimo de estado de carga un 20% [15]. En los ensayos se utilizará un 25%, guardando así un margen de seguridad por si en algún momento hay un consumo mayor del esperado como por ejemplo una racha de viento o alguna aceleración más brusca debida a la forma de conducir de un determinado conductor. Usando como base el sistema PRIMOVE de Bombardier, capaz de suministrar potencias entre 100 y 500 kW, se han realizado cálculos para diferentes potencias (200, 300, 400 y 500 kW). A continuación se muestran los resultados para el valor intermedio de potencia de 300 kW. El resto de tablas y gráficas pueden consultarse en el *ANEXO IV*. Carga de baterías a distintas potencias.

Carga por las noches

Como primera opción, se ha estudiado la posibilidad de que las baterías del tranvía se recargasen durante la noche en las cocheras para así evitar la construcción de infraestructuras en las paradas. Para ello, el sistema de almacenamiento de energía debería tener la capacidad suficiente para que el tranvía circule durante todo el día sin que este se agote. Según los cálculos realizados anteriormente y el horario de funcionamiento se ha estimado lo siguiente:

Horas de funcionamiento al día	19 (de 5:00 a 00:00 según horario oficial)
Duración de un recorrido completo (ida y vuelta)	1 hora y 30 minutos (incluido espera en extremos para cumplir frecuencia)
Consumo en un recorrido completo	135,21 kWh (5,33 kWh/km de gasto medio a plena capacidad)
Porcentaje de capacidad utilizable	75% (margen de 25% para no dañar baterías)

Tabla 10. Datos de carga durante la noche

$$Capacidad\ batería = \frac{\frac{19 \frac{horas}{día}}{1,5 \frac{horas}{trayecto}} * 135,21 \frac{kWh}{trayecto}}{0,75} \approx 2284\ kWh$$

Ecuación 6. Capacidad de batería con carga en cocheras

El tranvía de zaragoza, utiliza baterías de Niquel Metal Hidruro (NiMH), que con el desarrollo actual, pueden llegar a tener una densidad de energía de aproximadamente 100 Wh/kg. Si se desean utilizar unas de este tipo, supondrían un peso extra de 23 toneladas. Incluso si se sustituyeran las baterías por unas de Lón-Litio con una densidad de energía de 200 Wh/kg, estas aún pesarían alrededor de 11 toneladas, por lo que seguiría siendo un paquete muy grande y pesado. Un aumento de peso así, supondría un gran aumento de consumo, que habría que recalcular, lo que llevaría a necesitar baterías aun mas grandes.

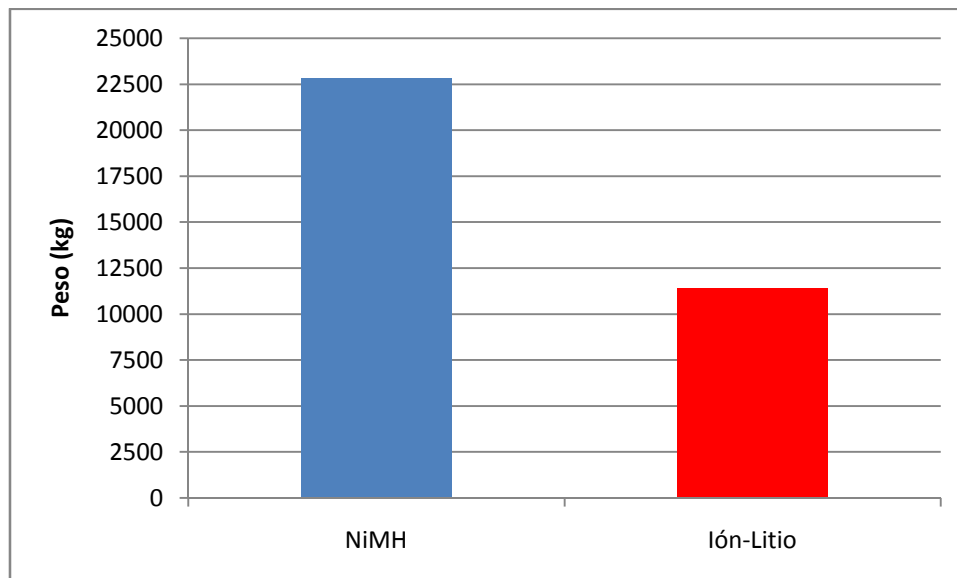


Gráfico 17. Comparación peso de batería según tipo

Carga en extremos

Tras considerarse inviable el uso de baterías que impulsen al tranvía durante todo el día sin recargarse, se estudió la posibilidad de recargarlas en los extremos de la línea, mientras espera para cumplir la frecuencia de paso. Para ello, se han tomado las siguientes consideraciones:

Consumo	71 kWh (5,6 kWh/km)
Porcentaje de capacidad utilizable	70% (margen de 25% para no dañar baterías y carga máxima del 95%)
Potencia de carga	300 kW
Eficiencia de carga	90 %

Tabla 11. Datos carga en extremos a 300 kW de potencia

$$\text{Capacidad batería} = \frac{71 \text{ kWh}}{0,7} \approx 102 \text{ kWh}$$

Ecuación 7. Capacidad de batería con carga en extremos de 300 kW

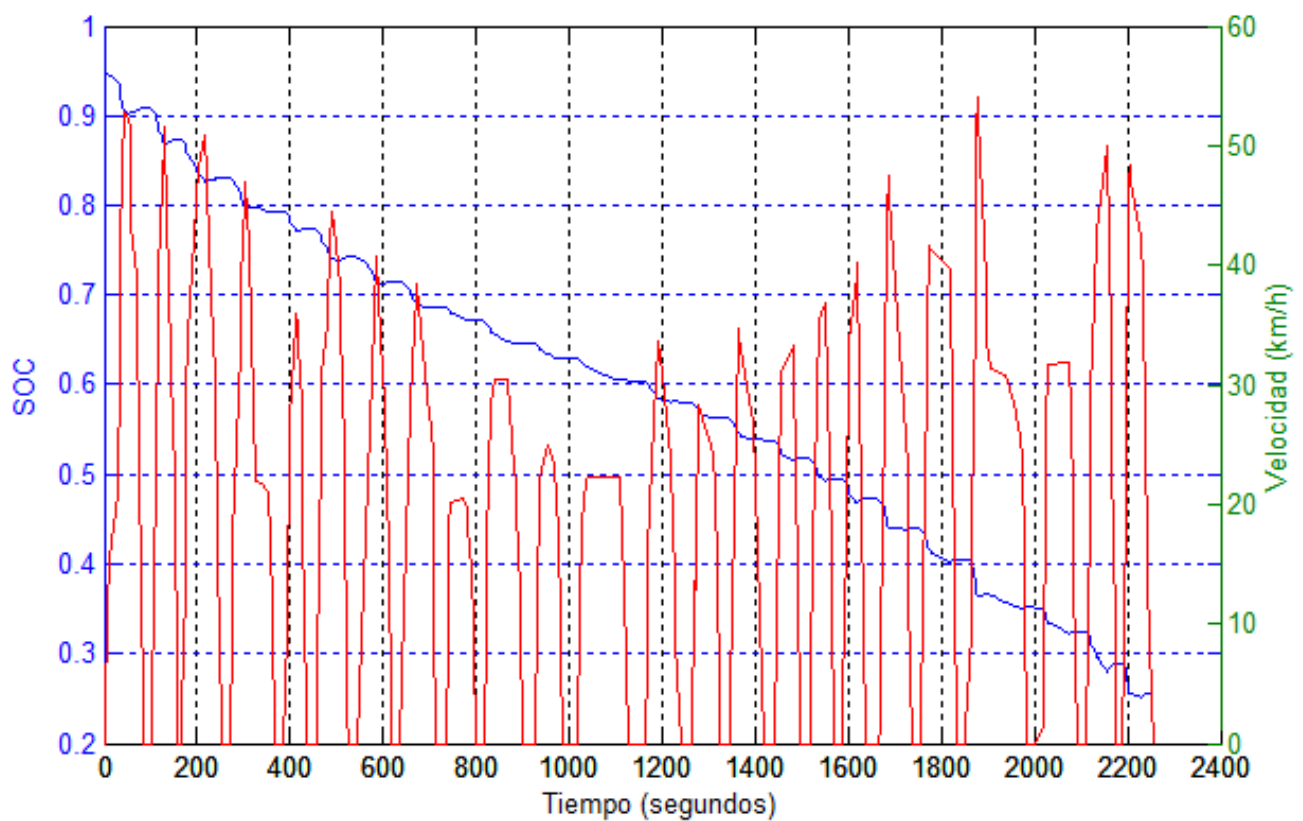


Gráfico 18. Representación del SOC y la velocidad a lo largo del recorrido

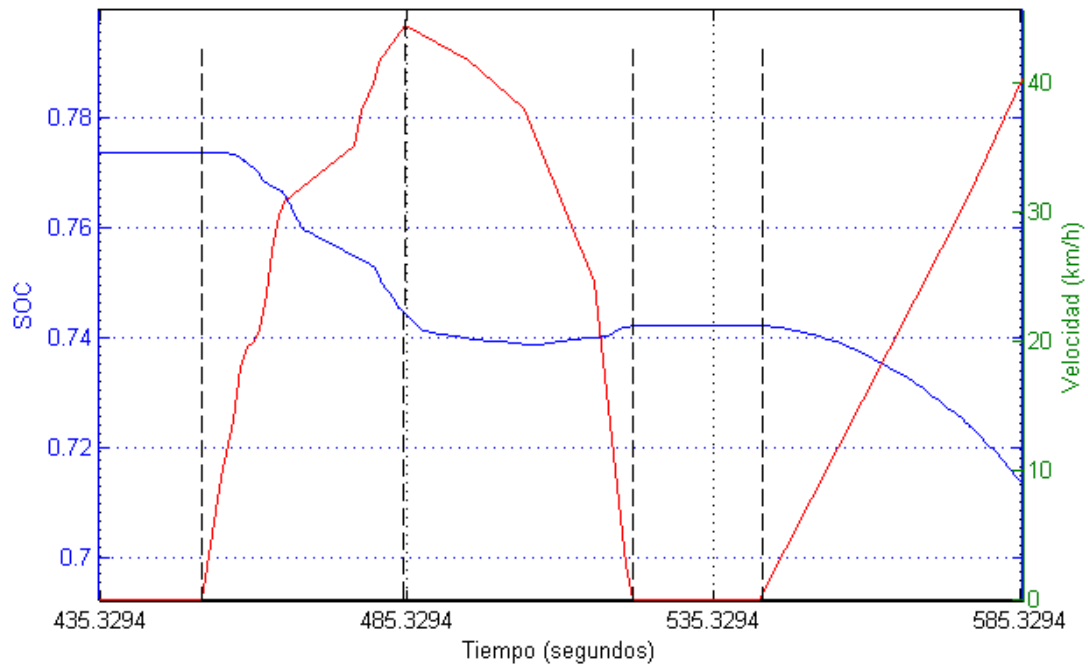


Gráfico 19. Detalle comparación SOC y velocidad

En el *Gráfico 18* se muestra la evolución del SOC de una batería de 102 kWh en función de la velocidad. En el detalle del *Gráfico 19* se observa cómo cuando el tranvía acelera el SOC disminuye. Al frenar aumenta ligeramente por el frenado regenerativo. Mientras está detenido el SOC permanece invariable.

El dato de consumo corresponde al del sentido Academia - Valdespartera, ya que es mayor que en el otro. Se puede observar cómo en esta ocasión, la batería necesaria es de mucha menor capacidad. Empleando también baterías de NiMH, estas pesarían poco más de 1 tonelada. Atendiendo a cómo afecta el aumento de peso al consumo final según la cantidad de pasajeros, el peso extra de las baterías no supondría un aumento de consumo considerable (aproximadamente 0,66 kWh).

$$\text{Tiempo de recarga} = \frac{71 \text{ kWh}}{300 \text{ kW} * 0,9} \approx 0,26 \text{ horas} = 16 \text{ minutos}$$

Ecuación 8. Tiempo de recarga de baterías con carga en extremos de 300 kW

Potencia (kW)	Tiempo de recarga (min)
200	24
300	16
400	12
500	9,5

Tabla 12. Resumen tiempos de recarga carga en extremos según potencia

La *Tabla 12* recoge los datos de tiempo de recarga necesario dependiendo de la potencia. Los cálculos pueden consultarse en el apartado "*Carga en extremos*" del *ANEXO IV*. Carga de baterías a distintas potencias

Hay horas del día en las que la frecuencia de paso del tranvía es de 5 minutos. Si tuviese que estar 16 parado en un extremo recargando, serían necesarios más convoyes para cumplir horarios. Otra alternativa sería aumentar la potencia de carga. En caso de usar 500 kW, tan solo se necesitarían 10 minutos para recargar las baterías, sin embargo, esto podría suponer un aumento del coste de la infraestructura necesaria al requerir elementos (convertidores, rectificadores...) capaces de soportar mayores voltajes e intensidades y además seguiría siendo demasiado tiempo.

Carga en paradas

Para reducir el tiempo de carga en los extremos, se ha estudiado un caso en el que también carga en las paradas de toda la línea. Para realizar los cálculos se ha creado una curva en la que se representa la potencia de carga en función del tiempo. Cuando el tranvía está circulando, esta tiene valor nulo y cuando está detenido, el valor de carga elegido. Se ha considerado que el sistema de carga tarda 1 segundo en conectarse mientras el sistema detecta el tranvía y se ajusta la posición desde que el tranvía se ha detenido y se desconecta instantáneamente al arrancar., es decir, el tiempo total de carga en cada parada es 1 segundo menor que la duración de la misma. Con estos criterios, la curva creada para el sentido Academia - Valdespartera es:

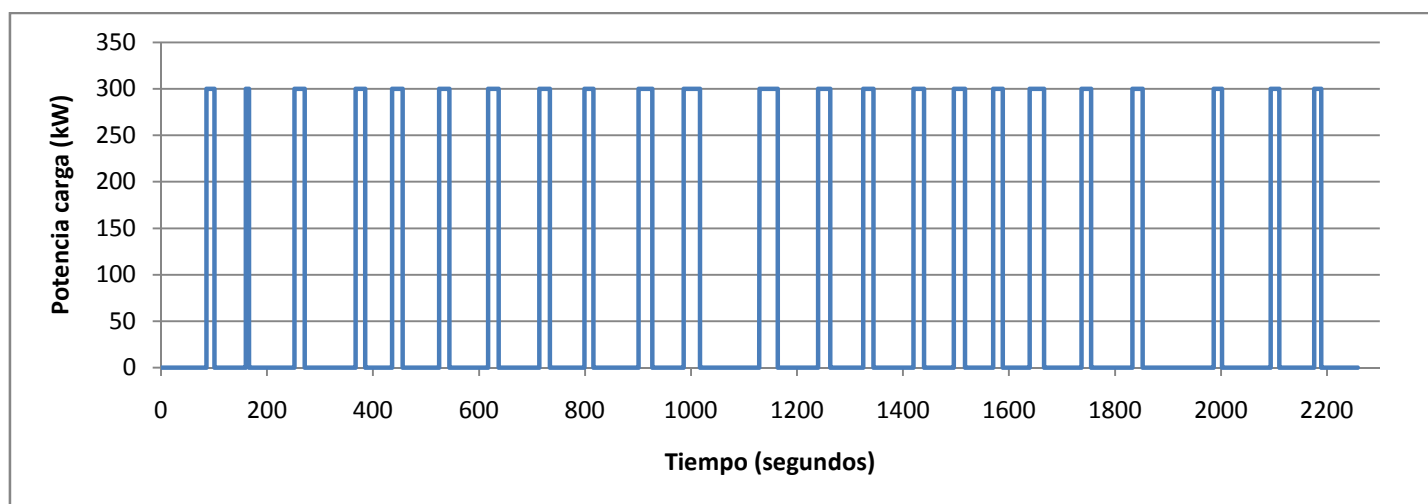
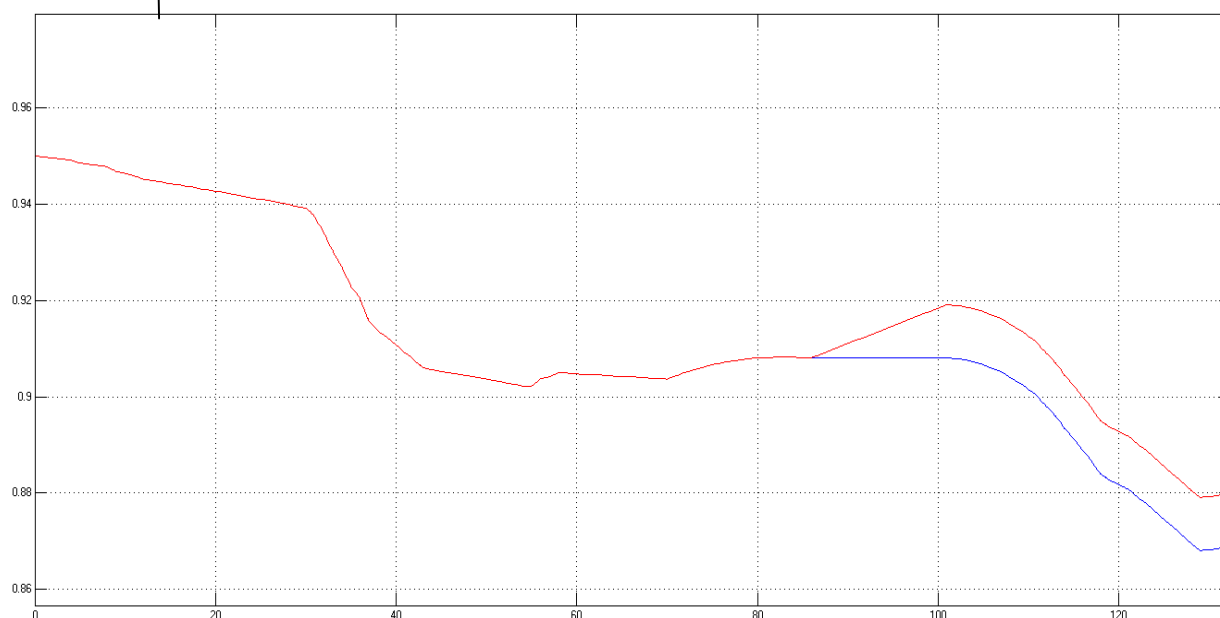
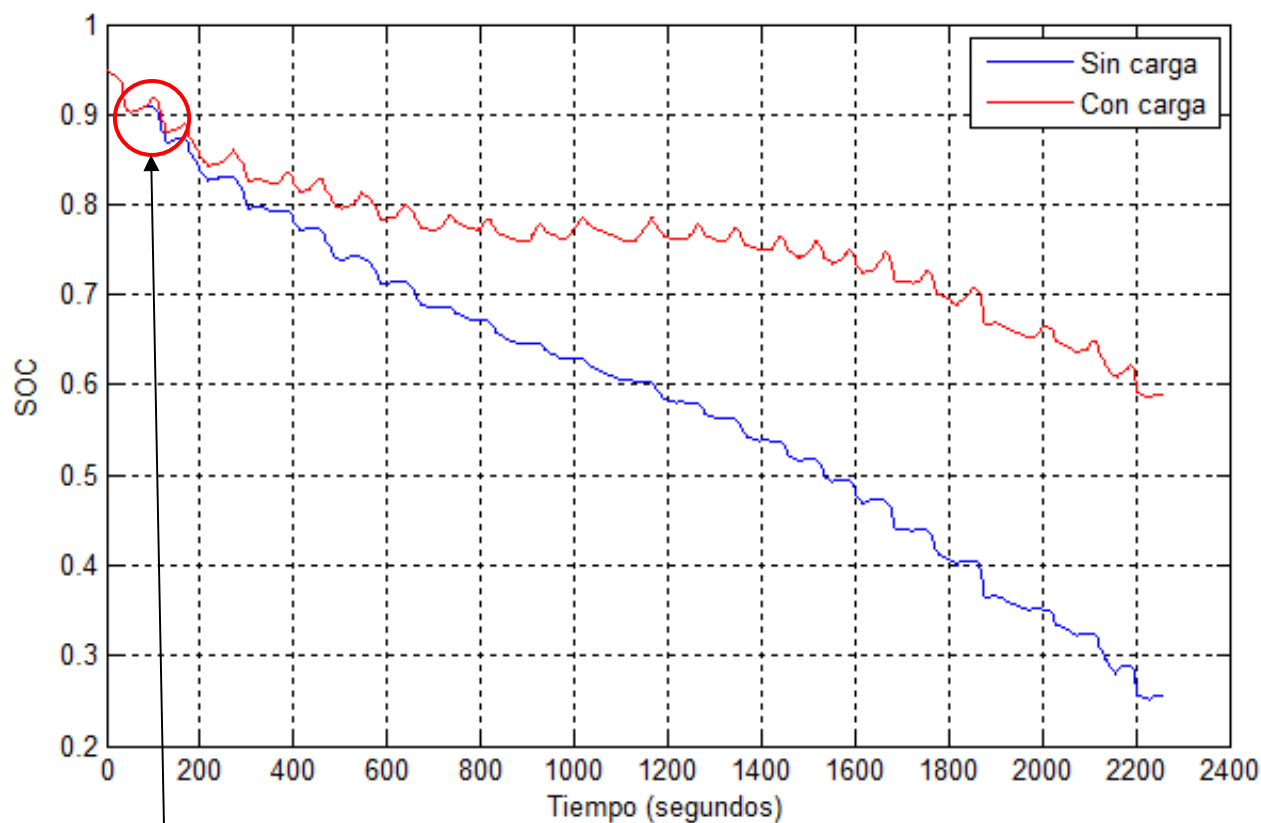


Gráfico 20. Potencia de carga de 300 kW en paradas sentido Academia-Valdespartera

En el apartado "*Tiempos de carga*" del *ANEXO IV*. Carga de baterías a distintas potencias puede consultarse la duración de cada parada para cada estudio realizado.



El Gráfico 21 compara la evolución el estado de carga de las baterías cuando realiza todo el trayecto sin cargar, y cuando lo hace en las paradas. Se observa cómo usando la misma batería, el SOC final es mucho mayor cuando se utiliza la carga por inducción (0.5898 frente a 0.2545). En el Gráfico 22 se ve en detalle la evolución del SOC entre dos paradas. Mientras el

tranvía circula, el consumo es el mismo en ambos casos pero al llegar a la parada, en el caso sin carga no varía (línea azul) y en el de con carga, aumenta el SOC (línea roja). Esta es la razón por la que al final del recorrido el SOC es mayor. Como consecuencia de ello, la batería necesaria sería más pequeña. A continuación se calcula el tamaño que debería tener:

Consumido	71 kWh (5,6 kWh/km)
Tiempo cargando	456 segundos
Potencia de carga	270 kW (300 kW con 90% de eficiencia)
Porcentaje de capacidad utilizable	70 %

Tabla 13. Datos de carga en paradas a 300 kW de potencia

$$\text{Capacidad batería} = \frac{71 \text{ kWh}_{\text{consumidos}} - \left(\frac{456 \text{ seg}}{3600 \frac{\text{seg}}{\text{hora}}} * 270 \text{ kW} \right) \text{ kWh}_{\text{cargados}}}{0,7} \approx 53 \text{ kWh}$$

Ecuación 9. Capacidad de batería con carga en paradas de 300 kW

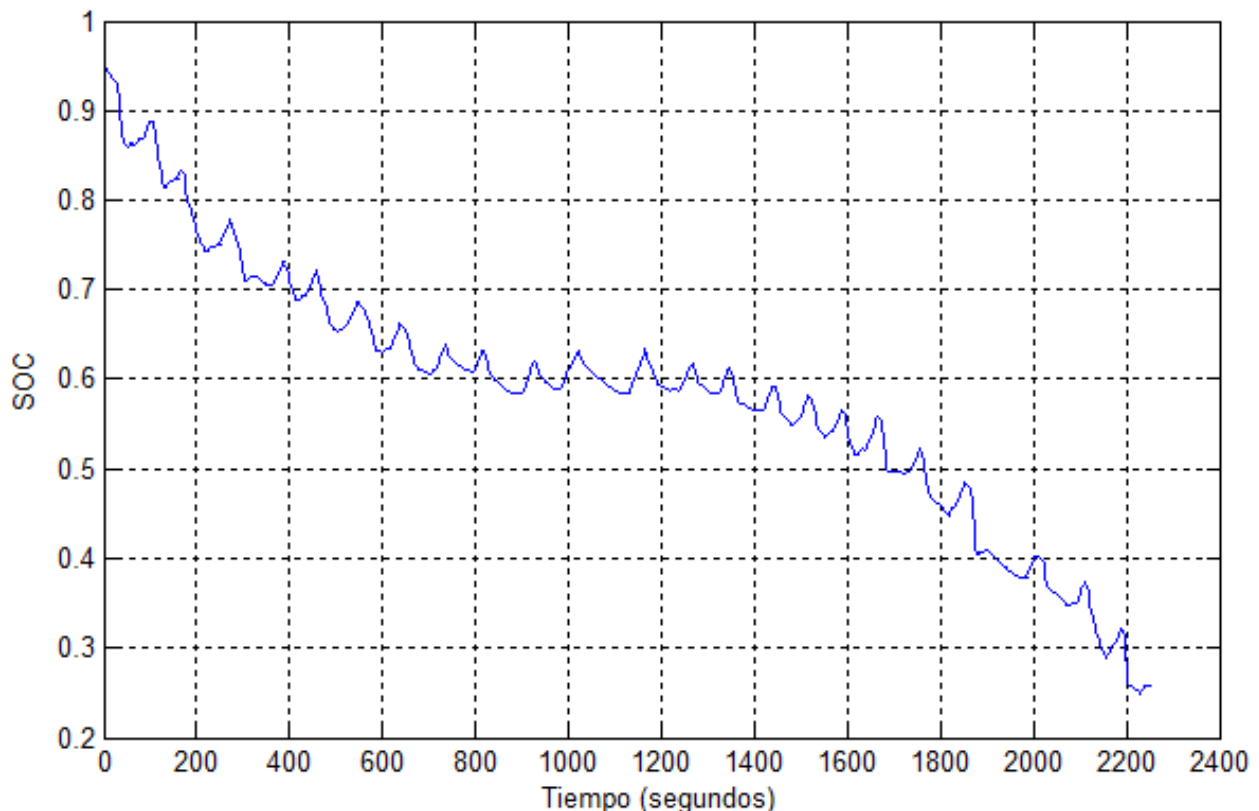


Gráfico 23. SOC de batería 53 kWh con carga en paradas

En el *Gráfico 23* está representado el SOC cuando se utiliza una batería de 53 kWh que se recarga en las paradas. En ella destaca que en la parte central del recorrido el consumo global es muy pequeño. En las paradas, se recarga casi todo lo que se ha gastado desde la anterior. Esto es lógico, pues esta parte corresponde al centro de la ciudad en donde la velocidad media es menor, hay menos pendiente y el tiempo en paradas recargando es mayor. Bajo estas condiciones, el tiempo necesario para volver a llenar las baterías es:

$$\text{Tiempo de recarga} = \frac{71 \text{ kWh} - 34,2 \text{ kWh}}{270 \text{ kW}} \approx 0,136 \text{ horas} = 8,2 \text{ minutos}$$

Ecuación 10. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas de 300 kW

Potencia (kW)	Capacidad batería (kWh)	Tiempo de recarga (min)
200	69	16
300	53	8,2
400	37	4,2
500	20	2

Tabla 14. Resumen capacidad de baterías y tiempos de recarga con carga en paradas según potencia

En la *Tabla 14* se recogen los datos de capacidad de batería necesaria y tiempos de recarga según la potencia, cuando se realiza carga en las paradas. Los cálculos y las diferentes gráficas se encuentran en el apartado "*carga en paradas*" del *ANEXO IV*. Carga de baterías a distintas potencias. Se observa cómo el tiempo necesario y la capacidad de las baterías se reducen significativamente a medida que se aumenta la potencia de carga. En algunos momentos del día en los que la frecuencia de paso es menor, sería suficiente cargar a 300 kW, sin embargo, en hora punta, habría que cargar a 400 kW para cumplir horarios. Como se ha comentado, aumentar la potencia podría conllevar un aumento de los costes. Por ello, se ha hecho otro estudio aumentando el tiempo de parada.

Carga en paradas durante tiempo fijo

Para reducir más el tamaño de las baterías y el tiempo final de carga, se han modificado las curvas de velocidad y de carga de tal manera que en cada parada el tranvía permanezca cargando 25 segundos (26 segundos estacionado). En este caso la curva de carga es la siguiente:

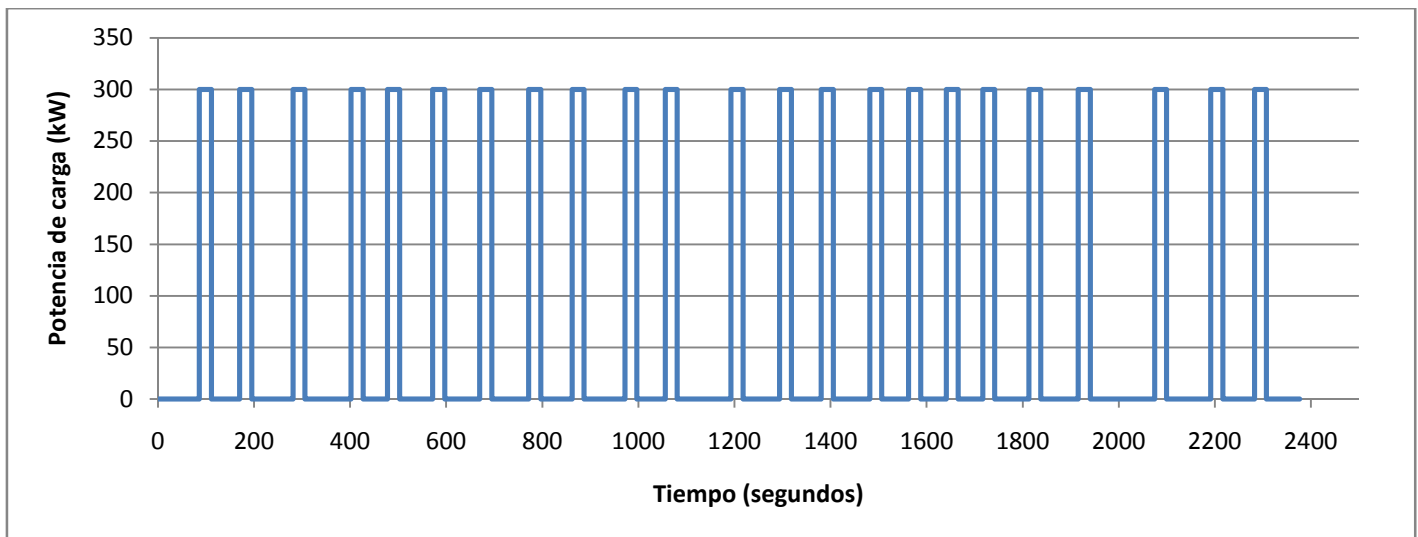


Gráfico 24. Potencia de carga de 300 kW sentido Academia-Valdespartera con tiempo fijo

Al cargar durante más tiempo, es de esperar que el tamaño de la batería necesaria sea menor. Comparando el SOC del estudio anterior con el de este para la batería de 71 kWh, se obtiene el siguiente resultado:

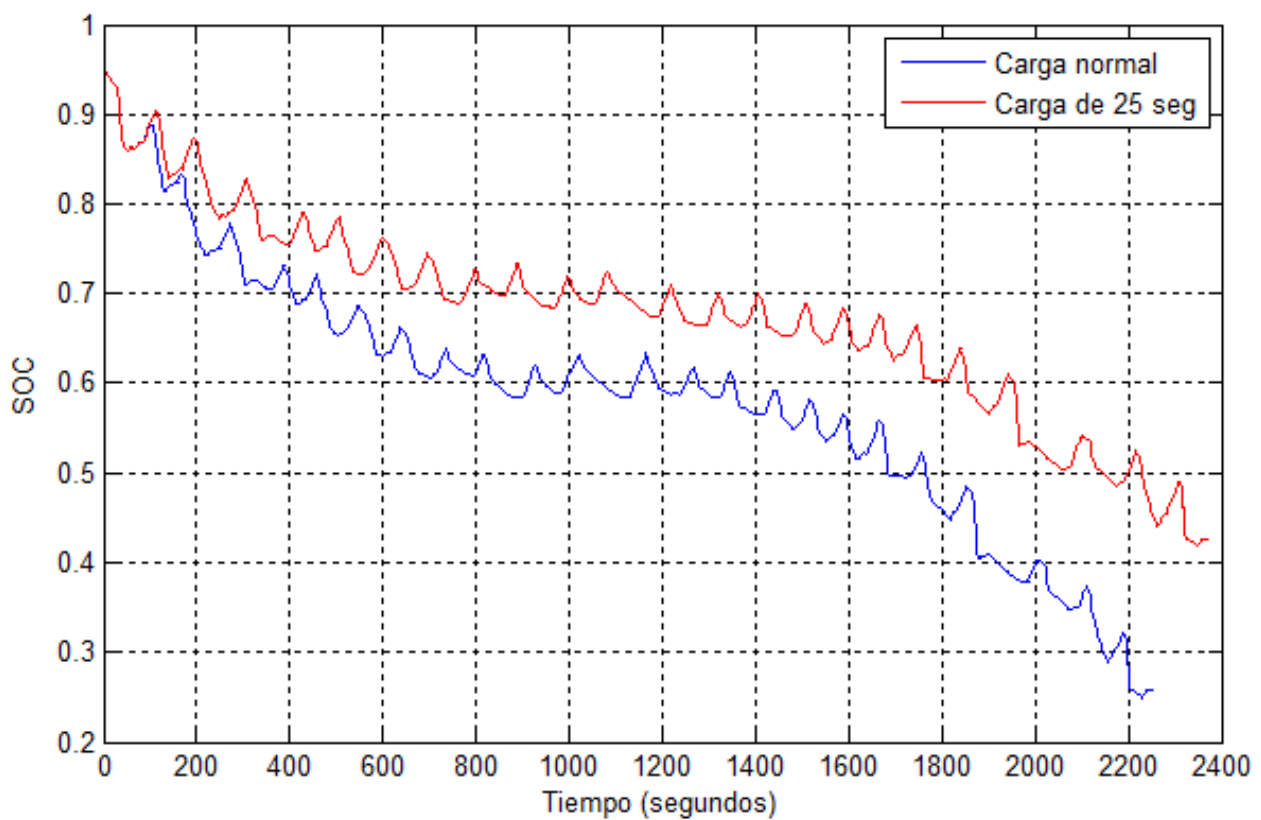


Gráfico 25. Comparación SOC según tiempo de carga de 300 kW en paradas

Comparando el SOC de una misma batería según el tiempo de carga en paradas se observa que la ganancia es considerable (el SOC final aumenta desde 0.2568 hasta 0.4251). En la parte central del recorrido la diferencia de variación del SOC es muy pequeña ya que en ambos casos, el tiempo detenido en cada parada es muy similar. Sin embargo, en el resto de paradas dónde ahora permanece mucho más tiempo estacionado, se aprecia cómo se carga mucha más energía lo que hace que la curva disminuya mucho menos llegando a un SOC mayor. Por lo tanto, ahora la batería necesaria sería:

Consumido	71 kWh (5,6 kWh/km)
Tiempo cargando	575 segundos (25 seg en cada una de las 23 paradas)
Potencia de carga	270 kW (300 kW con 90% de eficiencia)
Porcentaje de capacidad utilizable	70 %

Tabla 15. Datos de carga en paradas de 25 segundos a 300 kW

$$\text{Capacidad batería} = \frac{71 \text{ Kwh}_{\text{consumidos}} - \left(\frac{575 \text{ seg}}{3600 \frac{\text{seg}}{\text{hora}}} * 270 \text{ kW} \right) \text{ kWh}_{\text{cargados}}}{0,7} \approx 40 \text{ kWh}$$

Ecuación 11. Capacidad de batería con carga en paradas de 25 segundos a 300 kW

$$\text{Tiempo de recarga} = \frac{71 \text{ kWh} - 43.125 \text{ kWh}}{270 \text{ kW}} \approx 0,1 \text{ horas} = 6 \text{ minutos}$$

Ecuación 12. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas de 25 segundos a 300 kW

Potencia (kW)	Capacidad batería (kWh)	Tiempo de recarga (min)
200	61	14
300	40	6
400	20	2,25
500	10	2

Tabla 16. Resumen capacidad de baterías y tiempos de recarga con carga en paradas de 25 segundos según potencia

En la *Tabla 16* se resumen todos los cálculos realizados en este estudio para diferentes potencias de carga. Se pueden consultar más en detalle en el apartado "Carga en paradas durante un tiempo fijo" del *ANEXO IV*. Carga de baterías a distintas potencias Al aumentar el tiempo de carga en paradas, el de recarga en los extremos se ha reducido. Gracias a ello ahora casi sería suficiente con un sistema de 300 kW de potencia para lo cual solo sería necesaria una leve modificación en las frecuencias de paso, cambiando de 5 minutos a 6. En las horas del día en la que esta es menor, no sería necesario hacer ningún cambio.

No obstante, al fijar el tiempo en todas las paradas, se ha alterado un poco el funcionamiento normal. Según la curva calculada inicialmente, en algunas paradas, el tranvía está detenido más de 25 segundos, lo que daría lugar a una mayor carga, y en otros está bastante menos. Por esta razón, se ha realizado otro estudio en el que se han recalculando los tiempos en cada parada intentando optimizar el funcionamiento, y que el tiempo total de carga sea lo más parecido posible al de este estudio.

Optimización

Con el fin de aprovechar al máximo el tiempo de que el tranvía permanece en cada parada y que este no sea muy superior al de la curva original, se ha creado otra reajustándola según los siguientes criterios:

- En las paradas en las que el tiempo de estacionamiento es superior a 25 segundos, permanecerá parado ese tiempo (al tiempo de carga habrá que restar 1 segundo, que es lo que tarda en conectarse el sistema).
- En la paradas con una duración inferior a 25 segundos, el tiempo de parada será como máximo 10 segundos superior pero nunca superior a 26 (25 de carga más 1 de conexión).

De esta forma, la curva de carga es la siguiente:

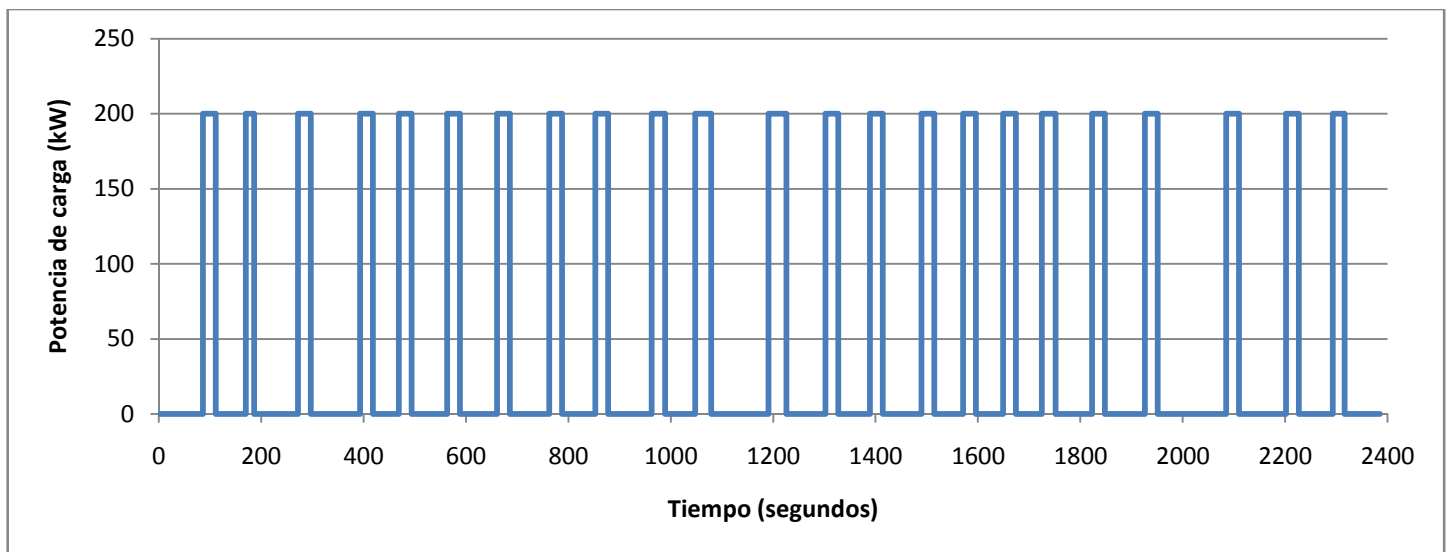


Gráfico 26. Potencia de carga de 300 kW sentido Academia-Valdespartera con tiempo optimizado

Consumido	71 kWh (5.6 KWh/km)
Tiempo cargando	583 segundos
Potencia de carga	270 kW (300 kW con 90% de eficiencia)
Porcentaje de capacidad utilizable	70 %

Tabla 17. Datos de carga de 300 kW en paradas con tiempo optimizado

Tras ajustar los tiempos de cada parada, se observa que el tiempo total de carga es casi idéntico al del estudio anterior. Por ello, la batería necesaria así como el tiempo de recarga será muy parecido.

$$\text{Capacidad batería} = \frac{71 \text{ Kwh}_{\text{consumidos}} - \left(\frac{583 \text{ seg}}{3600 \frac{\text{seg}}{\text{hora}}} * 270 \text{ kW} \right) \text{ kWh}_{\text{cargados}}}{0,7} \approx 39 \text{ kWh}$$

Ecuación 13. Capacidad de batería con carga en paradas con tiempo optimizado a 300 kW

$$\text{Tiempo de recarga} = \frac{71 \text{ kWh} - 43,125 \text{ kWh}}{270 \text{ kW}} \approx 0,1 \text{ horas} = 6 \text{ minutos}$$

Ecuación 14. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas con tiempo optimizado a 300 kW

Potencia (kW)	Capacidad batería (kWh)	Tiempo de recarga (min)
200	60	13,9
300	39	6
400	18,2	2,12

Tabla 18. Resumen capacidad de baterías y tiempos de recarga con carga en paradas con tiempo optimizado según potencia

En la *Tabla 18* se observa cómo al optimizar el tiempo de carga en cada parada, los valores finales de capacidad y recarga en extremos apenas varían. Por ello, la potencia de carga que mejor se ajustaría a las necesidades de la línea sigue siendo la de 300 kW.

Comparación de potencias

A continuación se expone una tabla resumen de todos los ensayos de carga mostrando la capacidad de las baterías y el tiempo de carga según cada potencia.

Potencia (kW)	Carga en extremos		Carga tiempo normal		Carga tiempo fijo	
200	102 kWh	24 minutos	69 kWh	16 minutos	61 kWh	14 minutos
300	102 kWh	16 minutos	53 kWh	8,2 minutos	40 kWh	6 minutos
400	102 kWh	12 minutos	37 kWh	4,2 minutos	20 kWh	2,25 minutos
500	102 kWh	9,5 minutos	20 kWh	2 minutos	10 kWh	2 minutos

Tabla 19. Comparación de potencias y situaciones de carga

Cómo se observa en la *Tabla 19*, la capacidad de las baterías necesarias y el tiempo de recarga varía mucho en función de la potencia, y de cuánto permanece el tranvía en cada parada.

De los resultados presentes se concluye que cargar únicamente en los extremos y así no tener que instalar un punto de carga en cada parada no es compatible con las frecuencias de paso del tranvía. Incluso cargando a 500 kW, los 9,5 minutos de recarga necesarios son muy superiores a los 5 entre tranvía y tranvía.

Instalando un punto e carga por inducción en cada parada de modo que el tranvía cargue las baterías durante el tiempo que permanece en ella según la curva inicial calculada, la potencia debería ser de 400 kW para que el tranvía pueda cumplir horarios.

Aumentando el tiempo de carga a 25 segundos en cada parada, el tiempo de recarga final en los extremos es de 6 minutos en caso de utilizar una potencia de 300 kW. Este tiempo es ligeramente superior a los 5 de frecuencia. Si esta se disminuyese un poco, 300 kW serían suficientes. En caso de no ser posible hacerlo, habría que aumentar la potencia a posiblemente

350 kW. Esta potencia seguiría siendo menor a los 400 kW necesarios si solo carga durante el tiempo calculado inicialmente, por lo que toda la electrónica de potencia necesaria podría ser más barata.

6. Conclusiones

- El consumo del tranvía de Zaragoza es de 5,6 kWh/km, valor relativamente bajo teniendo en cuenta sus dimensiones. De este, la mayor parte corresponde al gasto en tracción el cual asciende a los 3,66 kWh/km.
- Los sistemas auxiliares que incorpora suponen un gasto considerable, ascendiendo a 1,51 kWh/km por término medio, valor que puede ser superior en veranos muy calurosos en los que se utilice mucho el aire acondicionado.
- Las diferentes situaciones anómalas a las que se puede enfrentar el tranvía también tienen efecto en su consumo final. De ellas la más destacable es la hipotética parada en un semáforo que puede suponer un gasto extra de 0,05 kWh/km. Esto demuestra la efectividad que resulta el sistema de prioridad semafórica que incorpora.
- El frenado regenerativo, resulta muy eficiente en el ahorro de energía, lo que permite utilizar baterías de menor capacidad.
- No se considera rentable instalar en el tranvía baterías que le permitan funcionar durante todo el día sin recargarlas y hacerlo por las noches en cocheras. Estas deberían ser muy grandes y excesivamente pesadas.
- La capacidad de las baterías y el tiempo de recarga necesario varían mucho en función de la potencia de carga empleada y del tiempo que el tranvía permanece cargando en las paradas.
- Con el objetivo de utilizar un sistema lo más económicamente rentable posible, se propone cargar en las paradas durante 25 segundos a 300 kW de potencia y recargar las baterías completamente en los extremos.

7. Líneas futuras

Los cálculos realizados en el dimensionado de las baterías, se han hecho buscando reducir el tamaño de estas y el tiempo de recarga. Aunque se ha considerado que cuanto menor fuese la potencia, menor sería el peso de la infraestructura, no se ha estudiado el impacto económico en detalle. A su vez, aunque se ha explicado brevemente el funcionamiento de carga por inducción, no se ha profundizado en su diseño. Por ello unas posibles líneas de trabajo futuro serían:

- Estudio de viabilidad técnica y económica de la instalación de un sistema de carga por inducción para el tranvía de Zaragoza determinando si resulta rentable eliminar la catenaria.
- Diseño de un sistema de carga por inducción que permita cargar las baterías de un tranvía a una elevada potencia durante un breve periodo de tiempo

8. ANEXOS

8.1. ANEXO I. Cuadríptico del tranvía de Zaragoza



CAF

CONSTRUCCIONES Y ALAS DE PERFILES S.A.

TRANVÍA ZARAGOZA

Unidades para Tranvía Zaragoza

Units for Tranvía Zaragoza

Tranvía de ancho internacional, bidireccional con dos cabinas de conducción, constituido por 5 cajas articuladas que se apoyan en dos bogies motores en sus extremos, y en un bogie portante en la caja central.

International Gauge, two-cab, bidirectional tram, comprising 5 articulated body sections supported on two end motor bogies and one trailer bogie under the central section.



TRANVÍA ZARAGOZA

Unidades para Tranvía Zaragoza

El piso del tranvía es bajo en todo el departamento de viajeros. De esta manera, se eliminan las barreras existentes para transitar a lo largo de todo el tranvía al mismo tiempo que se consigue que la entrada y salida de viajeros desde andenes situados prácticamente a la altura de las aceras sea muy cómoda.

Los equipos principales están dispuestos sobre la cubierta.

Equipo de tracción basado en tecnología IGBT's y motores trifásicos asíncronos. Dispone de un equipo ACR híbrido provisto de ultracondensadores y baterías Ni-MH que permiten realizar el recorrido entre dos estaciones eliminando la presencia de la catenaria en el trazado.

Freno de servicio es principalmente eléctrico complementado por freno hidráulico en todos los bogies. El freno de emergencia alcanza sus prestaciones por combinación de todos los diferentes sistemas de freno disponibles en la unidad, freno eléctrico, hidráulico y patines electromagnéticos.

El control del tren, así como de la tracción, el freno y el resto de equipos principales se realiza mediante microprocesadores.

Climatización de la sala de viajeros, de altas prestaciones. Equipo de climatización de cabina es independiente del de la sala de viajeros.

TRANVÍA ZARAGOZA

Units for Tranvía Zaragoza

The tram floor is low along the whole passenger saloon. In this way, the existing barriers are eliminated along the whole tram and the entry and exit of passengers from platforms located virtually at the level of the sidewalk is extremely comfortable.

The main equipments are roof mounted.

The traction equipment is IGBT technology based and comprises 3-phase asynchronous motors. It is fitted with a hybrid ACR unit equipped with ultracapacitors and Ni-MH batteries allowing the tram to cross the section between two stations without catenary.

The service brake is electrodynamic, and blending with hydraulic brake is done on all bogies. The emergency brake achieves its performance by combining all the different braking systems available on the unit, electrodynamic brake, hydraulic brake and electromagnetic shoes.

Train control, as well as traction-brake system and the other main equipment are controlled by means of microprocessors.

High performance passenger saloon HVAC. The cab air conditioning equipment is independent from that of the passenger saloon units.

Bogies

El tranvía dispone de dos bogies motores en los extremos y un bogie remolque en el centro, provistos de ruedas elásticas independientes.

El bastidor es de acero soldado. Suspensión primaria de resortes de acero-caucho. Suspensión secundaria de muelles helicoidales y amortiguadores.

El apoyo de caja sobre bogie se realiza directamente sobre los 4 resortes helicoidales de la suspensión secundaria.

Los bogies extremos disponen de cuatro motores montados de forma longitudinal. Los motores y reductores están completamente suspendidos

del bastidor de bogie con interposición de elementos elásticos de caucho.

El equipo de freno consta de un disco por rueda. El accionamiento del freno es hidráulico. Para casos de emergencia se incorporan dos patines de freno electromagnético al carril por bogie.

Bogies

The tram has two motor bogies on the ends and one trailer bogie in the middle, fitted with separate resilient wheels.

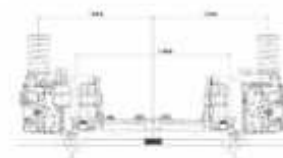
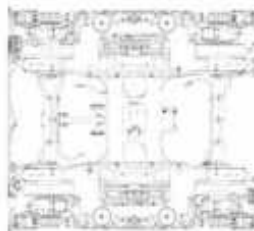
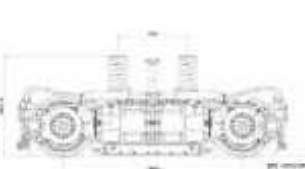
The underframe is stainless steel. The primary suspension is accomplished by steel-rubber springs. Secondary suspension accomplished with coil

springs and dampers. The carbody is directly supported on the bogie on the 4 coil springs of the secondary suspension.

The end bogies have four longitudinal mounted motors. The motors and gear units are completely suspended from the bogie frame, with a number of in-

terspaced rubber elastic components.

The brake unit consists of one disc per wheel. Brake operation is hydraulic. In the event of emergency occurrences, two electromagnetic rail brakes are used on each bogie.



Cajas

Estructura

La estructura portante de los módulos es una estructura mixta compuesta por diferentes materiales:

- Perfiles extruidos de aluminio soldados entre sí para construir los principales conjuntos portantes (cubiertas,

Interior

Departamento de viajeros continuo a lo largo de todo el tranvía, con una altura de piso de 350 mm. Lunas fijas de vidrio templado en parsol Gris. El revestimiento interior varía según zonas:

costados y partes del bastidor)

- Acero Corten en zonas de apoyo de bogies

- Composite en cabina y en el bastidor de los módulos suspendidos.

Las uniones entre bastidor y costados, y entre cubierta y costados se

- Laminado de poliéster reforzado con fibra de vidrio en montantes de puertas, cajón bogies, revestimiento cabina y encimera de pupitre.

- Laminado de alta presión (HPL) en tapas de ventanas y costados de sala.
- Aluminio de extrusión en paneles ba-

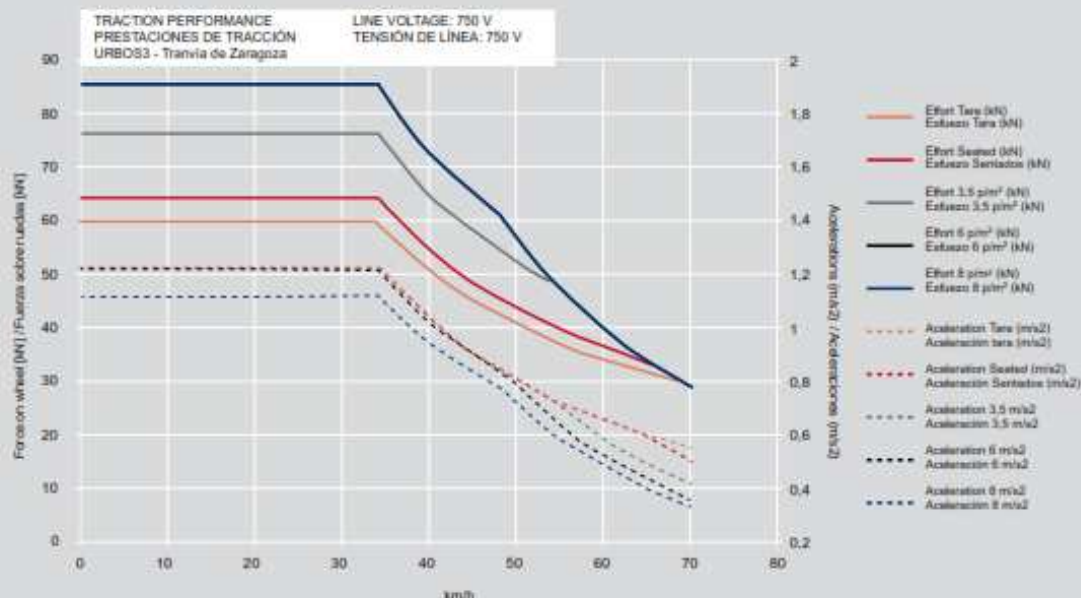
leva a cabo mediante remaches de alta resistencia.

La cabina es un módulo independiente que se conecta al resto de la caja, acabada e instalada.

tientes y perfiles de luminarias.

- Chapa de aluminio en revestimientos de techo.

El alumbrado es fluorescente, dispuesto longitudinalmente en el techo.





Capacidad

Plazas sentadas	40 (+12 abatibles)
De pie (6 w/m2)	244
Total	296
La unidad dispone de cuatro plazas para silla de ruedas.	

Capacity

Seated places	40 (+12 Tip-ups)
Standing (6 pass./m2):	244
Total	296
The unit has four places for wheelchairs.	

Carbodies

Structure

The carbody structure is a mixed structure consisting of various materials:

- Extruded aluminium sections welded to each other to construct the main su-

Interior

Continuous passenger saloon along the whole tram, with a floor height of 350 mm. Fixed glazing of Parsol Grey hardened glass. Interior linings shall vary according to the areas:

porting assemblies (roofs, sidewalls and parts of the underframe).

- Corten Steel in bogie support areas.
- In-cab composite on the frame of the suspended modules.

The joins between the underframe and

- Fibreglass reinforced polyester laminate on door posts, bogie box, cab lining and desk top.

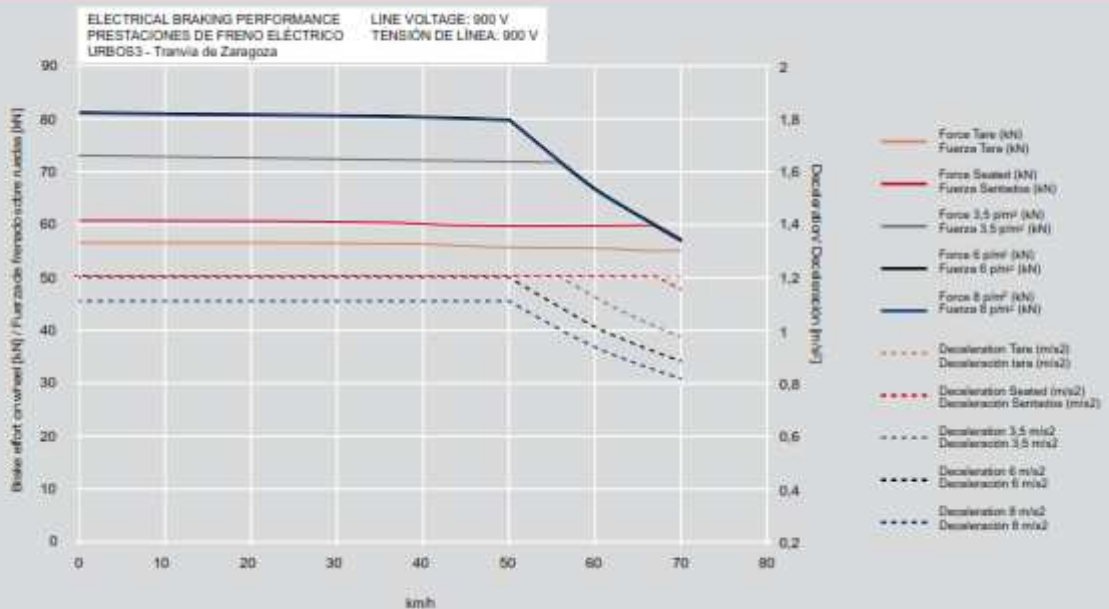
- High pressure laminate (HPL) on window caps and saloon sidewalls.
- Extruded aluminium on swinging pa-

sidewalls, and between the roof and sidewalls is realised using highly resistant rivets. The cab is a separate module which is connected to the rest of the carbody, completed and installed.

nels, and lighting sections.

- Aluminium plate on roof linings.

Lighting is fluorescent with a longitudinal arrangement on the ceiling.



Sistema de Tracción

Captación de corriente de catenaria mediante pantógrafo de accionamiento eléctrico. El tranvía dispone del sistema ACR (Acumulador de Carga Rápida) que le permite circular entre estaciones sin captar corriente de la catenaria, y con recarga rápida en paradas. Así mismo, permite acumular la energía de frenado, con el correspondiente

ahorro.

2 inversores de tracción dobles, uno por cada bogie extremo motorizado, refrigerado por aire mediante ventilación forzada.

Electrónica de potencia IGBT.

Freno dinámico, reostático con resistencia

de freno de convección natural y regenerativo con devolución de corriente a la catenaria, o a los módulos del ACR.

Motores trifásicos, asíncronos con rotor cortocircuitado en jaula de ardilla.

Otros equipos

Dos convertidores auxiliares con una potencia nominal total de 100kVA a una salida trifásica de 400Vac para alimentación de los equipos de corriente alterna.

Dos cargadores de batería con una potencia de 5,5kW cada uno a 24Vdc que alimentan las cargas en continuo y carga de batería.

Se dispone de una **batería de Ni-Cd** con una capacidad de 260Ah.

Aire acondicionado de sala. Dos equipos compactos por tranvía montados en techo, cada equipo dispone de dos circuitos frigoríficos. Capacidad de 35,8 kW en refrigeración y 16 kW en calefacción. El líquido refrigerante es R-407c.

Aire acondicionado de cabina. Un equipo compacto por cabina montado en el techo. Capacidad de 4 kW en refrigeración y 3,5 kW en calefacción. El líquido refrigerante es R-407c.

Información a viajeros acústica, y visual:
- Megafonía, que incluye anunciador automático de estaciones y emisión de música.

- Carteles exteriores
- Monitores TFT de 17" interiores para información y entretenimiento
- Intercomunicadores (viajero/conductor) asociados a tiradores de alarma

Registrador de eventos y video

Sistema de control del tren y diagnóstico mediante lógica programada.

Vigilancia del tren por circuito cerrado de televisión.

Areneros para los bogies motores.

La unidad dispone de **cuatro plazas para silla de ruedas**, donde también se encuentran 3 asientos abatibles.

Puertas. Las puertas son automáticas, del tipo encajable deslizante exterior, de accionamiento eléctrico y mando por microprocesador, con pulsadores en hoja de puerta, detección de obstáculos por corriente de motor y detección de paso de viajeros por célula fotoeléctrica.

Sistema de radiocomunicación.

Control de mando semafórico que permite dotar al tranvía de un sistema de prioridad semafórica con objeto de optimizar la velocidad comercial.

Sistema de control de agujas y señalización (CASE): Gestiona la dirección del tranvía en los desvíos y la supervisión de las señales en vía, así como las restricciones de velocidad.

SAE: Sistema de Ayuda a la Explotación

Cuentapersonas: Se encarga de realizar el recuento de personas que entran y salen del tranvía, sirviendo de ayuda a la explotación del mismo.

Billeteaje: incluye máquina expendedora y canceladoras de tarjetas.

WIFI que permite la conexión del CASE, SAE y billeteaje.

Peso

Tranvía en tara: 45.450 kg

Weight

LRV at tare: 45,450 kg

Prestaciones

Tensión de alimentación:	750 VDC
Velocidad máxima de servicio:	70 km/h
Potencia nominal:	560 kW
Aceleración máxima:	1,2 m/s ²
Deceleración del freno de servicio:	1,2 m/s ²
Deceleración del freno de emergencia:	2,8 m/s ²
Radio mínimo de curva:	20 m

Performance

Power supply voltage:	750 VDC
Maximum service speed:	70 km/h
Rated power:	560 kW
Maximum acceleration rate:	1.2 m/s ²
Service brake deceleration rate:	1.2 m/s ²
Emergency brake deceleration rate:	2.8 m/s ²
Minimum curve radius:	20 m

Dimensiones

Ancho vía:	1.435 mm
Longitud:	32.366 mm
Anchura exterior:	2.650 mm
Altura de piso:	350 mm
Altura exterior (pantógrafo abatido):	3.600 mm
Distancia entre bogies:	11.245 mm
Diámetro de ruedas:	590/510 mm
Altura de enganche:	350 mm
Paso libre puertas hoja doble:	1.300 mm
Nº de puertas hoja doble por costado:	4
Paso libre puertas hoja simple:	800 mm
Nº de puertas hoja simple por costado:	2

Dimensions

Track gauge:	1,435 mm
Length:	32,366 mm
Exterior width:	2,650 mm
Floor height:	350 mm
Exterior height (pantograph down):	3,600 mm
Distance between bogies:	11,245 mm
Wheel diameter:	590/510 mm
Coupler height:	350 mm
Double leaf door clearance:	1,300 mm
Number of double leaf doors per side:	4
Single leaf doors clearance:	800 mm
Number of single leaf doors per side:	2





**Factoría de Beasain
Beasain Factory**

José Miguel Iturrioz, 26
20200 Beasain (Gipuzkoa)
España
caf@caf.net

Phone number: +34 943 880 100
Fax: +34 943 881 420

**Factoría de Irun
Irun Factory**

Anaca, 13
20301 Irun (Gipuzkoa)
España
caf@caf.net

Phone number: +34 943 613 342
Fax: +34 943 618 155

**Factoría de Zaragoza
Saragossa Factory**

Avd. de Cataluña, 299
50014 Zaragoza
España
caf@caf.net

Phone number: +34 976 765 100
Fax: +34 976 572 648

**Factoría Elmira - USA
Elmira Factory**

300 East Eighteenth Street
Elmira, NY 14903
USA
elmira@cafusa.com

Phone number: +1-607 732 5251
Fax: +1-607 737 3118

CAF Argentina, S.A.

Santa María del Buen Aire 1001
(C1277ABO) Ciudad Autónoma de
Buenos Aires - ARGENTINA

cafadministracion@cafarg.com.ar

Phone number: +54 11 43 03 37 00
Fax: +54 11 43 01 90 14

CAF Mexico, S.A. de C.V.

Prolongación Uxmal, 988
Colonia Sta.Cruz Atoyac
03310 México D.F. - MEXICO

cafmxico@caf.net

Phone number: +52 55 568 875 43
Fax: +52 55 568 811 56

CAF Brasil Indústria e Comércio , S.A.

Rua Tabapuã, 81 10 andar,
São Paulo, SP - Brasil - CEP: 04533-010
BRASIL

cafsaopaulo@cafbrasil.com.br

Phone number: +55 11 3167 1720
Fax: +55 11 3079 8762

CAF USA Inc.

1401 K Street N.W. Suite 803
20005-3418 WASHINGTON DC
USA

mail@cafusa.com

Phone number: +1-202 898 48 48
Fax: +1-202 216 89 29

**Domicilio Social
Registered office**

JM Iturrioz 26
20200 Beasain (Gipuzkoa)
España

**Oficinas Generales
Administration offices**

Padilla, 17
28006 Madrid
España

Phone number: +34 914 366 000
Fax: +34 914 360 396



CONSTRUCCIONES Y AUXILIAR DE FERROCARRILES S.A.

e - mail: caf@caf.net

www.caf.net

8.2. ANEXO II. Curvas de velocidad y altura

A continuación, se muestran datos más en detalle de las curvas de velocidad y altura calculadas a partir de las medidas tomadas. Los tiempos están representados en segundos, la distancia y desnivel en metros y la velocidad en km/h.

Academia-Valdespartera

Parada	Tiempo circulando	Tiempo estacionado	Distancia recorrida	Velocidad máxima	Desnivel
Avenida de la Academia	-	-	-	-	-
Parque Goya	85	16	700,375	52,875	-0,4
Juslibol	58	7	492,179	51,525	0
Campus Rio Ebro	85	20	801,766	14,120	-11,4
Margarita Xirgu	95	19	681,805	13,063	-3,7
Legaz Lacambra	50	21	301,705	35,892	0
Clara Campoamor	68	20	586,781	44,555	-2
Rosalía de Castro	72	21	456,938	40,725	2,6
Martínez Soria	76	21	528,156	37,800	0
La Chimenea	64	18	297,372	20,484	2,8
Plaza Pilar Murallas	84	27	550,344	30,375	2,8
Cesar Augusto	58	32	311,091	24,876	-0,2
Plaza España	111	36	590,485	22,284	0
Plaza Aragón	75	24	460,591	33,696	-0,8
Gran Vía	61	20	351,406	28,350	-1,2
Fernando el Católico	75	21	467,663	34,740	2
Plaza San Francisco	55	22	369,375	33,300	2,8
Plaza Emperador	52	19	357,596	36,828	1,5
Romareda	50	28	340,234	40,248	3,8
Casablanca	70	19	549,625	47,475	6,3
Argualas	77	20	690,676	41,625	13,9
Los Olvidados	133	17	1064,620	54,000	22,5
Los Pájaros	91	17	547,364	31,392	0,5
Cantando bajo la lluvia	65	14	590,113	50,040	0
Mago de Oz	66	-	561,156	48,375	2,2
TOTAL	1776	479	12.649,517	-	44,0

Tabla 20. Datos sentido Academia-Valdespartera

Valdespartera-Academia

Parada	Tiempo circulando	Tiempo estacionado	Distancia recorrida	Velocidad máxima	Desnivel
Mago de Oz			562,709		-2,2
Un Americano en Paris	81	18	590,100	43,308	0,0
La Ventana Indiscreta	77	16	680,698	35,550	-0,5
Los Olvidados	94	19	1066,341	30,600	-22,5
Argualas	123	22	668,108	38,268	-13,9
Casablanca	77	24	557,270	47,250	-6,3
Romareda	74	28	376,896	37,708	-3,8
Plz Emperador	53	23	356,699	33,516	-1,5
Plz San Francisco	56	27	369,210	34,524	-2,8
Fernando el Católico	68	23	468,170	24,480	-2,0
Gran Vía	72	24	350,950	30,096	1,2
Plz Aragón	67	29	462,853	23,328	0,8
Plz España	85	29	575,890	30,708	0,0
Cesar Augusto	139	27	296,869	16,380	0,2
Plz Pilar Murallas	62	25	571,174	24,075	-2,8
La Chimenea	86	21	299,571	32,400	-2,8
María Montessori	59	19	568,410	25,164	0,0
León Felipe	76	19	292,989	37,512	-2,6
Pablo Neruda	51	25	597,532	32,400	2,0
Adolfo Aznar	78	16	289,170	35,100	0,0
García Abril	47	19	700,344	35,460	3,7
Campus Rio Ebro	94	16	770,249	40,725	11,4
Juslibol	91	10	496,969	44,325	0,0
Parque Goya	54	18	724,205	52,200	0,4
Avenida de la Academia	94	-	562,709	45,108	-2,2
TOTAL	1858	497	12.693,374	-	-44,0

Tabla 21. Datos sentido Academia-Valdespartera

8.3. ANEXO III. Lista de variables

En la construcción del modelo de cálculo empleado se creó la siguiente lista de variables:

Nombre	Valor	Descripción
masa	45.450 + pasajeros*	Masa del vehículo + pasajeros (kg)
rozam	0,006	Coeficiente de resistencia a la rodadura
grav	9,81	Constante gravitacional (m/s^2)
dens	1,25	Densidad del aire (kg/m^3)
area	9,54	Área frontal del vehículo (m^2)
aerod	0,6	Coeficiente de resistencia aerodinámica
masrot	1,2	Coeficiente de aceleración de masas rotativas
efifreno	0,55	Eficiencia de frenado regenerativo
efitransmision	0,93	Eficiencia de la transmisión
efimotor	0,9	Eficiencia del motor
efidrivemotor	0,91	Eficiencia convertidor de tracción
eficonvertidor	0,91	Eficiencia convertidor DC/DC
radio_rueda	0,295	Radio de la rueda
carga	*	Potencia de carga (kW)
eficarga	0.9	Eficiencia del sistema de carga
Vwind	*	Velocidad del viento (m/s)
aca_vald	matriz 463x9	Datos de curvas sentido Academia-Valdespartera
vald_aca	matriz 565x9	Datos de curvas sentido Valdespartera-Academia
difconduct	matriz 72x5	Datos de curvas estudio influencia del conductor
semaforo	matriz 36x12	Datos de curvas estudio parada en semáforo

Tabla 22. Variables utilizadas en modelo Matlab

Los valores con (*) no son fijos. Se han utilizado diferentes valores para los diferentes estudios explicados en la memoria.

Las matrices "aca_vald" y "vald_aca" se componen de las siguientes columnas: Con cada una de ellas, se ha creado una variable vector que se ha utilizado para introducir las curvas al modelo.

- Columna 1:** Tiempo transcurrido en cada momento (segundos).
- Columna 2:** Velocidad del tranvía en cada momento (km/h).
- Columna 3:** Pendiente del terreno en cada momento (°).
- Columna 4:** Igual que la columna 1 pero correspondiente a la curva modificada para ajustar el tiempo de parada a 25 segundos cada una (segundos).
- Columna 5:** Tiempo transcurrido al llegar a cada parada y al salir de ella.
- Columna 6:** Potencia de carga. Relacionada con la columna 5. Cuando el tranvía está en marcha toma valor nulo y cuando está parado valor 1. Al multiplicarse por la variable "carga" representa la curva de carga.
- Columna 7:** Igual que la columna 5 pero correspondiente a la curva con paradas de 25 segundos.
- Columna 8:** Igual que la columna 1 pero correspondiente a la curva modificada para optimizar el tiempo de cada parada (segundos).

- Columna 9:** Igual que la columna 5 pero correspondiente a la curva con tiempo de paradas optimizado.

Todas las curvas empleadas en el modelo se han creado con el objeto "*Repeating sequence*" de Simulink. Como valor de tiempo de la curva se ha utilizado el vector creado a partir de la matriz, correspondiente a cada estudio. La otra componente de la curva es el vector de velocidad, pendiente, potencia de carga... según corresponda a cada curva. Por ejemplo:

Para el estudio de carga en aradas de 25 segundos se han empleado las siguiente curvas:

- Curva de velocidad:** Tiempo = vector columna 4, Velocidad = vector columna 2
- Curva de pendiente:** Tiempo = vector columna 4, Pendiente = vector columna 3
- Curva de carga:** Tiempo = vector columna 7, Potencia = vector columna 6

Para los estudios de la influencia del conductor se ha seguido el mismo procedimiento, estando formada la matriz por las siguientes columnas:

- Columna 1:** Tiempo transcurrido correspondiente a la curva de velocidad del conductor 1.
- Columna 2:** Velocidad en cada momento del conductor 1.
- Columna 3:** Pendiente en cada momento (idéntica para ambos conductores).
- Columna 4:** Tiempo transcurrido correspondiente a la curva de velocidad del conductor 2.
- Columna 5:** Velocidad en cada momento del conductor 2.

Lo mismo se ha realizado para la influencia de la parada en un semáforo dónde:

- Columna 1:** Tiempo transcurrido en el caso con semáforo.
- Columna 2:** Velocidad en cada momento en el caso con semáforo.
- Columna 3:** Pendiente en el caso con semáforo.
- Columna 4, columna 5 y columna 6:** Idénticas a las columnas 1, 2 y 3 pero del caso sin semáforo.
- Columnas 7 a 12:** Idénticas a las columnas 1 a 6 pero del caso creado con una velocidad inicial mayor (*Gráfico 11*).

Para los estudios de diferencia de conductor y semáforo no se ha calculado la carga de baterías al haberse empleado únicamente para el cálculo del consumo total.

8.4. ANEXO IV. Carga de baterías a distintas potencias

En este Anexo se incluyen todos los cálculos y gráficas correspondientes a cada uno de los estudios de carga de baterías realizados en el apartado 5.4 para potencias de 200, 400 y 500 kW. En la memoria, en cada estudio, se encuentran tablas resumen que recogen los resultados para cada una de las potencias de carga.

Carga en extremos

A continuación se muestran los datos y tiempos de recarga de baterías para potencias de 200, 400 y 500 kW.

Consumo	71 kWh (5,6 kWh/km)
Porcentaje de capacidad utilizable	70% (margen de 25% para no dañar baterías y carga máxima del 95%)
Potencia de carga	200 kW
Eficiencia de carga	90 %

Tabla 23. Datos carga en extremos a 200 kW de potencia

$$\text{Tiempo de recarga} = \frac{71 \text{ kWh}}{200 \text{ kW} * 0,9} \approx 0,40 \text{ horas} = 24 \text{ minutos}$$

Ecuación 15. Tiempo de recarga de baterías con carga en extremos de 200 kW

Consumo	71 kWh (5,6 kWh/km)
Porcentaje de capacidad utilizable	70% (margen de 25% para no dañar baterías y carga máxima del 95%)
Potencia de carga	400 kW
Eficiencia de carga	90 %

Tabla 24. Datos carga en extremos a 400 kW de potencia

$$\text{Tiempo de recarga} = \frac{71 \text{ kWh}}{400 \text{ kW} * 0,9} \approx 0,20 \text{ horas} = 12 \text{ minutos}$$

Ecuación 16. Tiempo de recarga de baterías con carga en extremos de 400 kW

Consumo	71 kWh (5,6 kWh/km)
Porcentaje de capacidad utilizable	70% (margen de 25% para no dañar baterías y carga máxima del 95%)
Potencia de carga	500 kW
Eficiencia de carga	90 %

Tabla 25. Datos carga en extremos a 500 kW de potencia

$$\text{Tiempo de recarga} = \frac{71 \text{ kWh}}{500 \text{ kW} * 0,9} \approx 0,16 \text{ horas} \approx 9,5 \text{ minutos}$$

Ecuación 17. Tiempo de recarga de baterías con carga en extremos de 500 kW

Se observa cómo conforme se aumenta la potencia de carga, el tiempo necesario para alcanzar el SOC máximo se reduce significativamente. No obstante, incluso con una potencia de 500 kW, el tiempo necesario es excesivo e incompatible con las frecuencias de paso a determinadas horas del día.

Carga en paradas

A continuación se muestran los datos y tiempos de recarga de baterías para potencias de 200, 400 y 500 kW cuando el tranvía también carga en las paradas durante el tiempo de espera

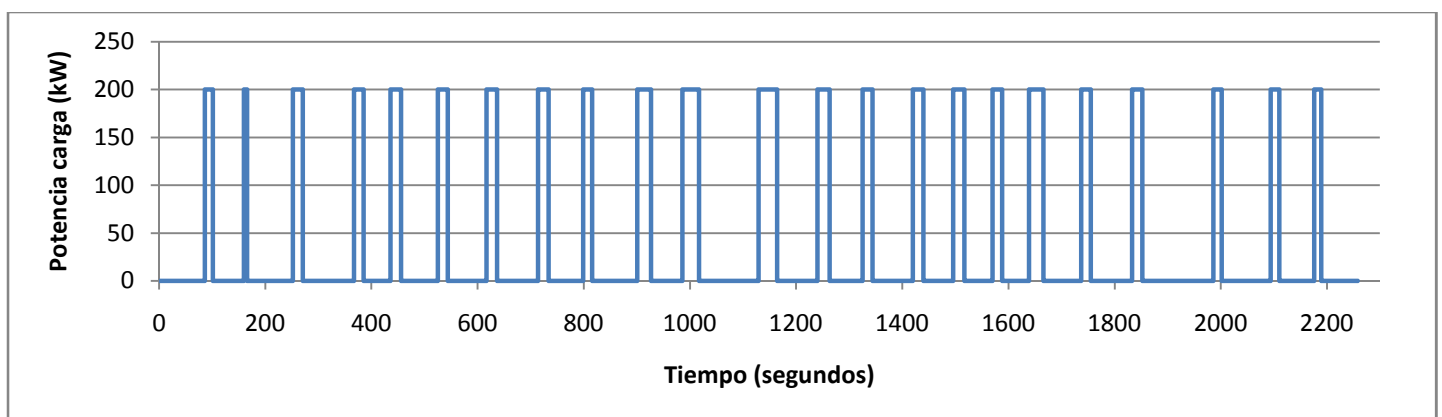


Gráfico 27. Potencia de carga de 200 kW en paradas sentido Academia-Valdespartera

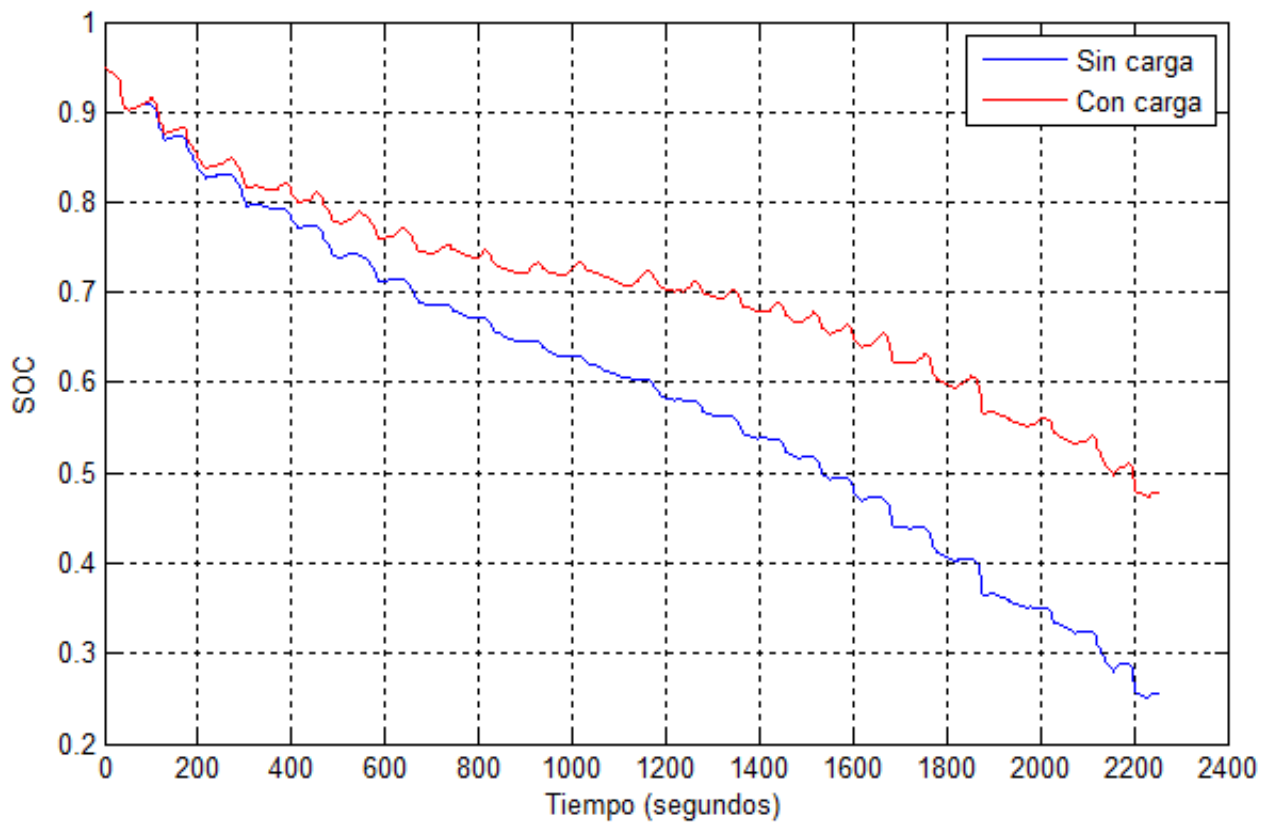


Gráfico 28. Comparación SOC de batería de 102 kWh con y sin carga de 200 kW

En el *Gráfico 28* se observa cómo cuando el tranvía carga las baterías durante el tiempo que permanece en las paradas, el SOC final de la misma batería de 102 kWh que se necesitaría si no lo hiciese, se ha multiplicado casi por 2 pasando de 0,2545 a 0,478.

Consumido	71 kWh (5,6 kWh/km)
Tiempo cargando	456 segundos
Potencia de carga	180 kW (200 kW con 90% de eficiencia)
Porcentaje de capacidad utilizable	70 %

Tabla 26. Datos de carga en paradas a 200 kW de potencia

$$\text{Capacidad batería} = \frac{71 \text{ kWh}_{\text{consumidos}} - \left(\frac{456 \text{ seg}}{3600 \frac{\text{seg}}{\text{hora}}} * 180 \text{ kW} \right) \text{ kWh}_{\text{cargados}}}{0,7} \approx 69 \text{ kWh}$$

Ecuación 18. Capacidad de batería con carga en paradas de 200 kW

Al cargar en las paradas durante 456 segundos a una potencia efectiva de 180 kW, el consumo total al final del ciclo es de 48,2 kWh, es decir, 22,8 kWh menor. Debido a ello, la capacidad de la batería necesaria, y con ello su tamaño y peso se han reducido poco más de un 30%.

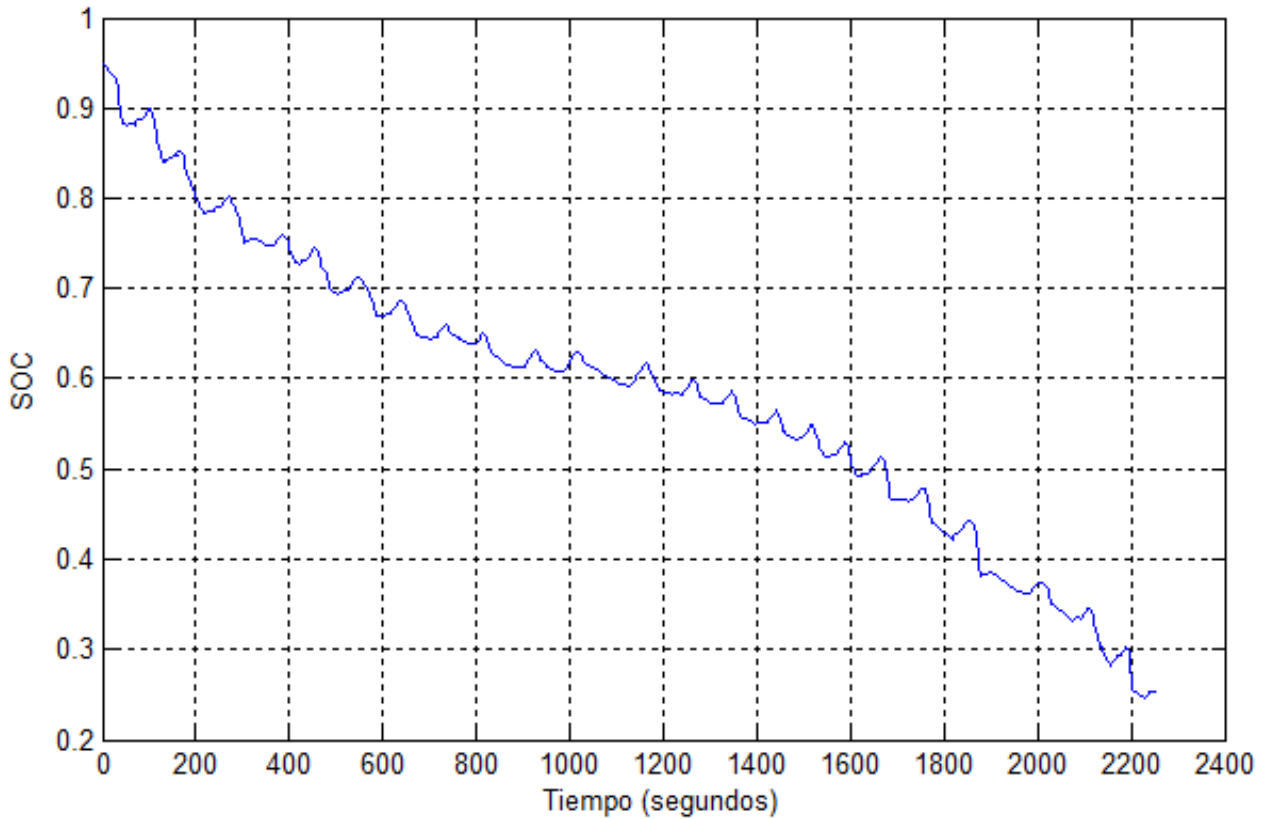


Gráfico 29. SOC de batería 69 kWh con carga en paradas

$$\text{Tiempo de recarga} = \frac{71 \text{ kWh} - 22,8 \text{ kWh}}{180 \text{ kW}} \approx 0,27 \text{ horas} = 16 \text{ minutos}$$

Ecuación 19. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas de 200 kW

Al tener que recargar menos energía, el tiempo necesario para hacerlo es mucho menor. El hecho de cargar durante las paradas hace que con una potencia de sólo 200 kW, el tiempo de recarga final sea similar al que se requería cuando únicamente se hacía en los extremos pero con 500 kW.

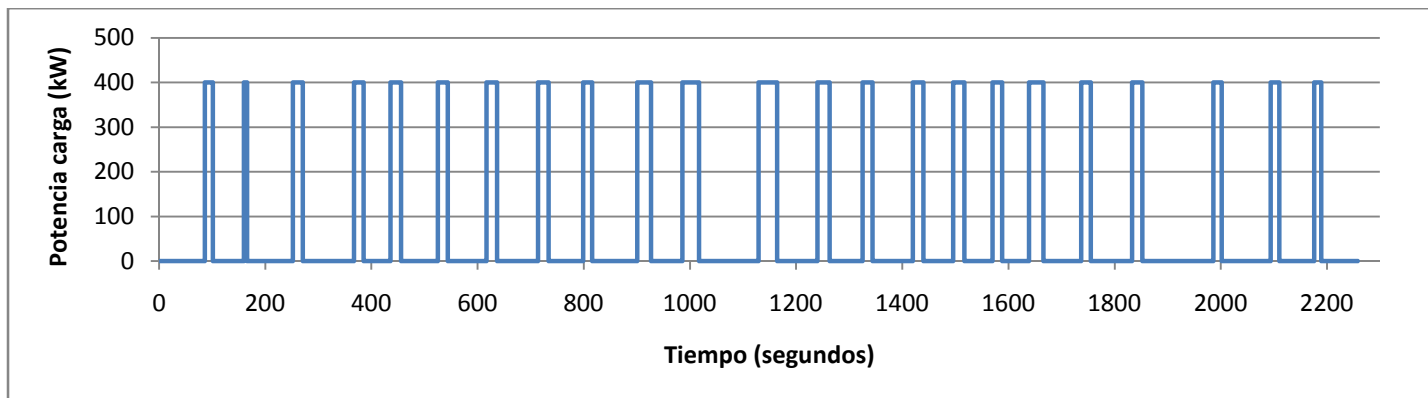


Gráfico 30. Potencia de carga de 400 kW en paradas sentido Academia-Valdespartera

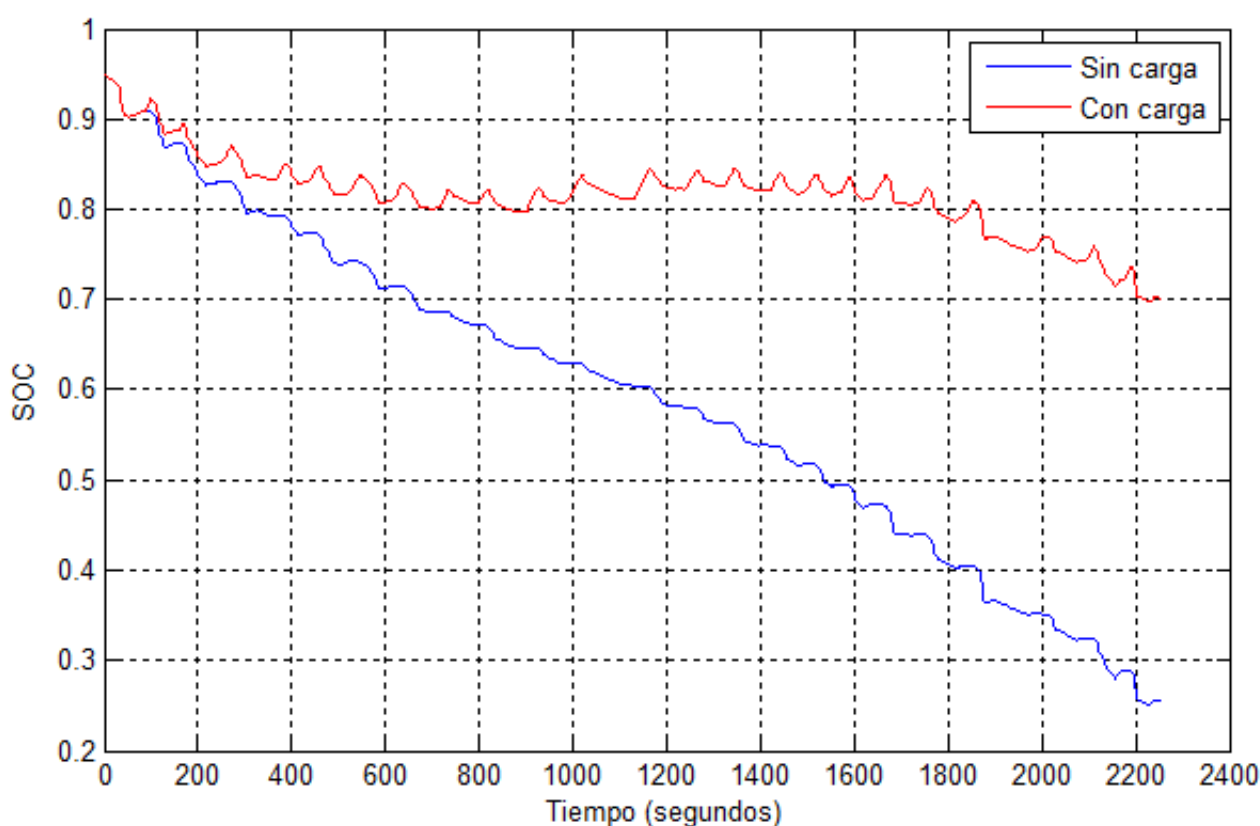


Gráfico 31. Comparación SOC de batería de 102 kWh con y sin carga de 400 kW

En esta ocasión, el SOC final de una batería de 102 kWh, es mucho mayor, concretamente 0,7016. Esto permitiría reducir en gran medida la capacidad de las baterías que necesitaría. Otra alternativa es que cómo la cantidad de energía empleada es de aproximadamente un 35%, se podría realizar otro trayecto sin recargarlas, disminuyendo así el número de ciclos de carga y descarga lo que aumentaría la vida útil. Sin embargo, cuando se tuviese que recargar, el tiempo necesario sería excesivo.

Consumido	71 kWh (5,6 kWh/km)
Tiempo cargando	456 segundos
Potencia de carga	360 kW (400 kW con 90% de eficiencia)
Porcentaje de capacidad utilizable	70 %

Tabla 27. Datos de carga en paradas a 400 kW de potencia

$$Capacidad\ batería = \frac{71\ kWh_{consumidos} - \left(\frac{456\ seg}{3600\ \frac{seg}{hora}} * 360\ kW \right) kWh_{cargados}}{0,7} \approx 37\ kWh$$

Ecuación 20. Capacidad de batería con carga en paradas de 400 kW

Ahora, la energía cargada en paradas es de 45,6 kWh, lo que hace que en los extremos solo falten por recargar 25,4 kWh.

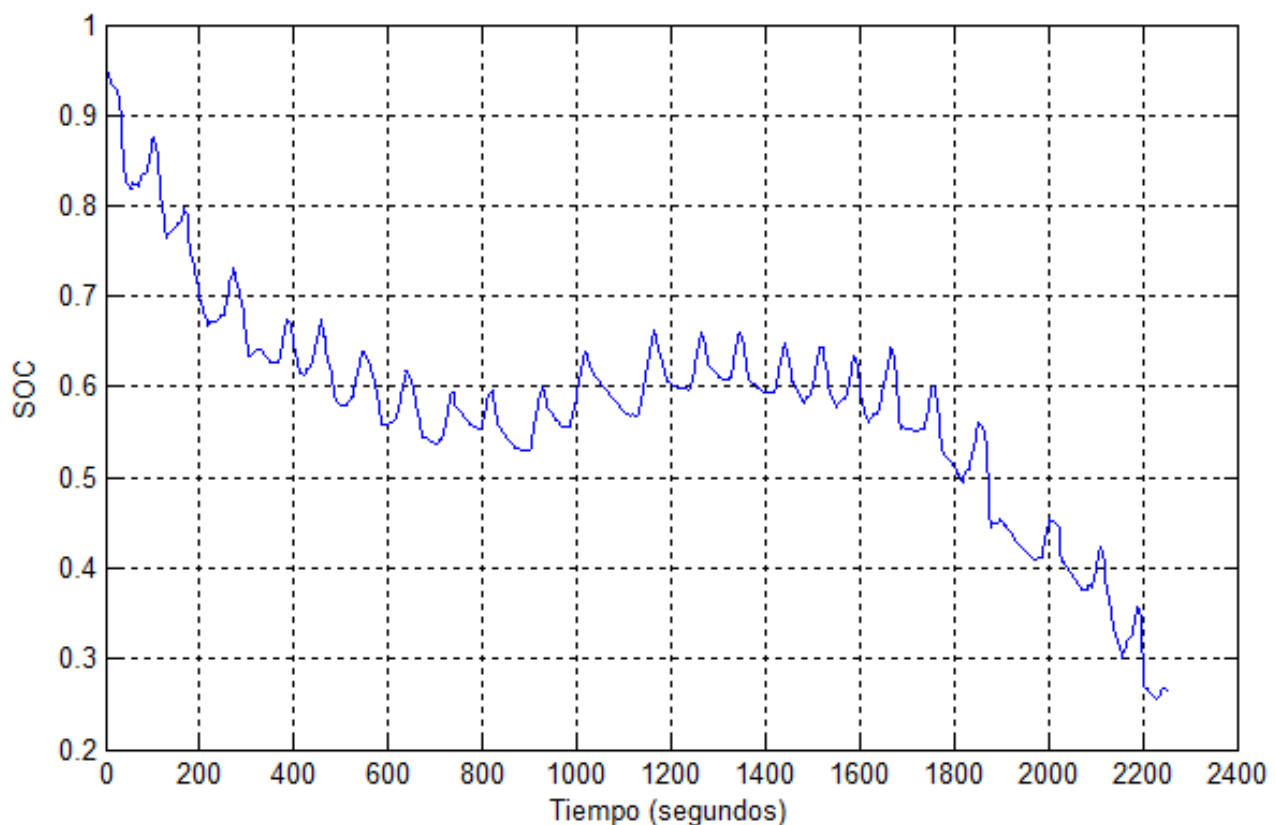


Gráfico 32. SOC de batería de 37 kWh con carga en paradas

En el *Gráfico 32*, llama la atención que de manera similar a lo que ocurriría con la carga de 300 kW y la batería de 53 kWh, aunque más notable, la variación del SOC en la parte central del recorrido es muy pequeña, llegando incluso a aumentar en algunas paradas.

$$\text{Tiempo de recarga} = \frac{71 \text{ kWh} - 45.6 \text{ kWh}}{360 \text{ kW}} \approx 0,07 \text{ horas} = 4,2 \text{ minutos}$$

Ecuación 21. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas de 400 kW

De nuevo, al cargar en las paradas, el tiempo de recarga final es mucho menor. En esta ocasión sería compatible con los 5 minutos de frecuencia de paso del tranvía en determinadas horas del día, por lo que la espera en los extremos no sería un inconveniente.

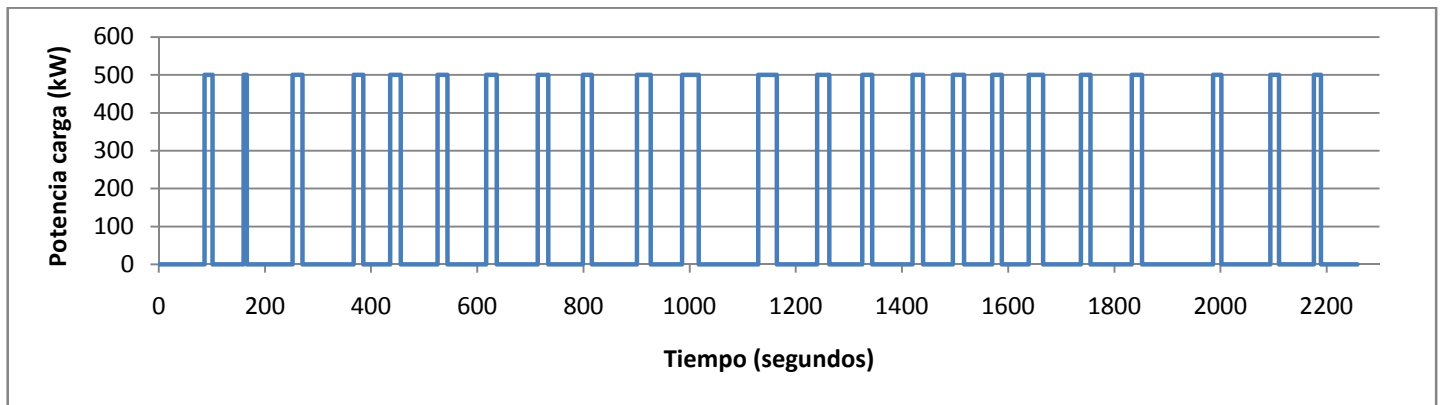


Gráfico 33. Potencia de carga de 500 kW en paradas sentido Academia-Valdespartera

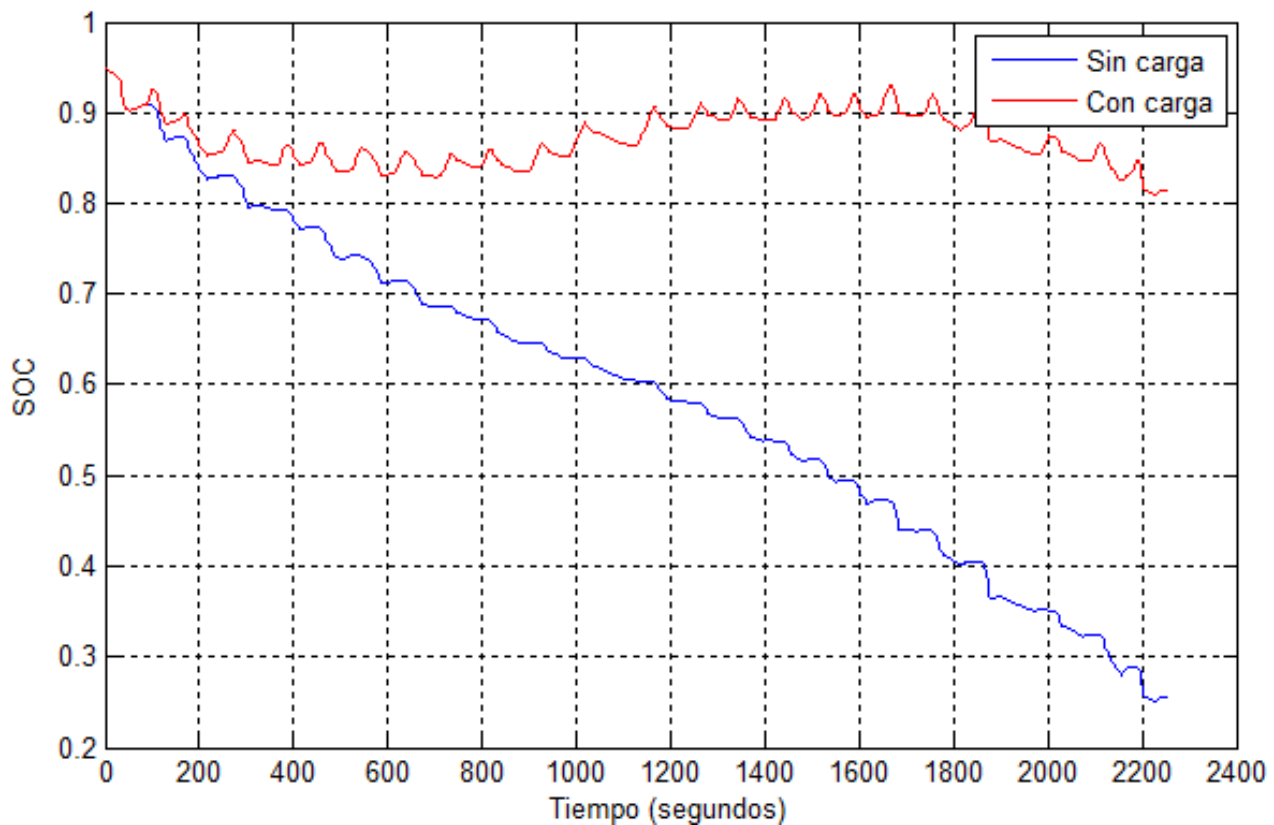


Gráfico 34. Comparación SOC de batería de 102 kWh con y sin carga de 500 kW

Al cargar con una potencia de 500 kW, el SOC de la batería de 102 kWh apenas ha disminuido, siendo el valor final 0.8134.

Consumido	71 kWh (5,6 kWh/km)
Tiempo cargando	456 segundos
Potencia de carga	450 kW (500 kW con 90% de eficiencia)
Porcentaje de capacidad utilizable	70 %

Tabla 28. Datos de carga en paradas a 500 kW de potencia

$$Capacidad\ batería = \frac{71\ kWh_{consumidos} - \left(\frac{456\ seg}{3600\ \frac{seg}{hora}} * 450\ kW \right) kWh_{cargados}}{0,7} \approx 20\ kWh$$

Ecuación 22. Capacidad de batería con carga en paradas de 500 kW

Con 450 kW de potencia efectiva, en las paradas se carga un total de 57 kWh. De esta manera, siguiendo los requisitos de porcentaje de batería utilizable para mantener los márgenes de seguridad, sería suficiente con una batería de 20 kWh, para almacenar los 14 kWh consumidos.

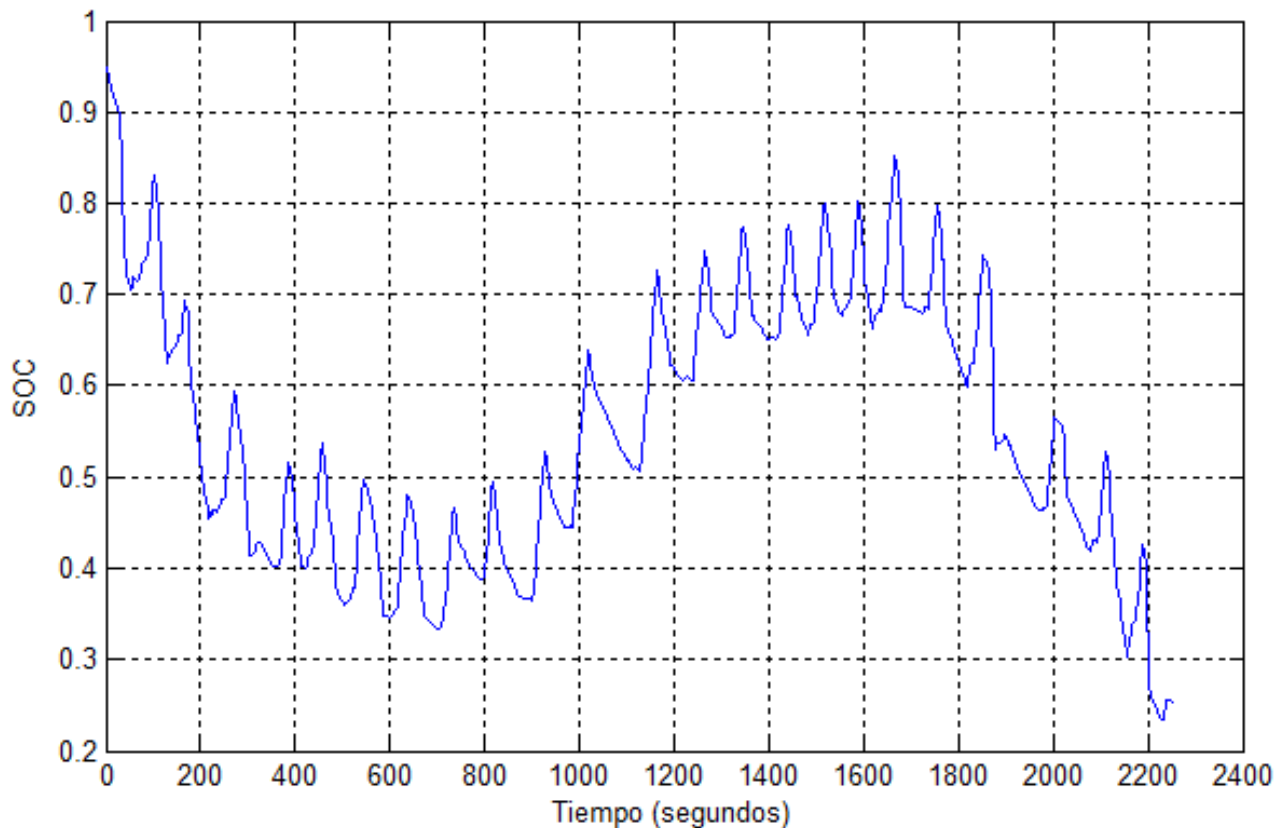


Gráfico 35. SOC de batería de 20 kWh con carga en paradas

En estas condiciones, el fenómeno que ya ocurría con menores potencias de que el SOC en la parte central aumentaba un poco, se repite de manera más clara, llegando a pasar de aproximadamente un 35% a un 85% solo por cargar en las paradas.

$$\text{Tiempo de recarga} = \frac{71 \text{ kWh} - 57 \text{ kWh}}{450 \text{ kW}} \approx 0,03 \text{ horas} = 2 \text{ minutos}$$

Ecuación 23. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas de 500 kW

Se observa cómo el tiempo de recarga se ha reducido hasta los 2 minutos. Dado que la frecuencia mínima de paso es de 5 minutos, el tranvía aún permanecería tiempo esperando. Por ello, no resulta rentable instalar una infraestructura de carga inductiva tan potente.

Carga en paradas durante tiempo fijo

En este apartado se muestran los datos y tiempos de recarga de baterías para potencias de 200, 400 y 500 kW cuando el tranvía también carga en las paradas durante un tiempo fijo de 25 segundos.

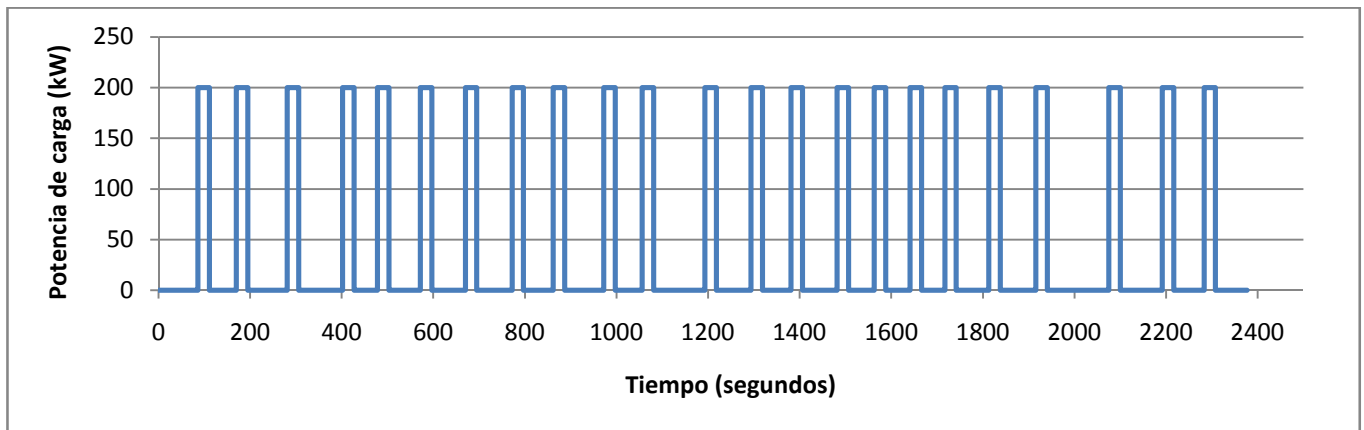


Gráfico 36. Potencia de carga de 200 kW sentido Academia-Valdespartera con tiempo fijo

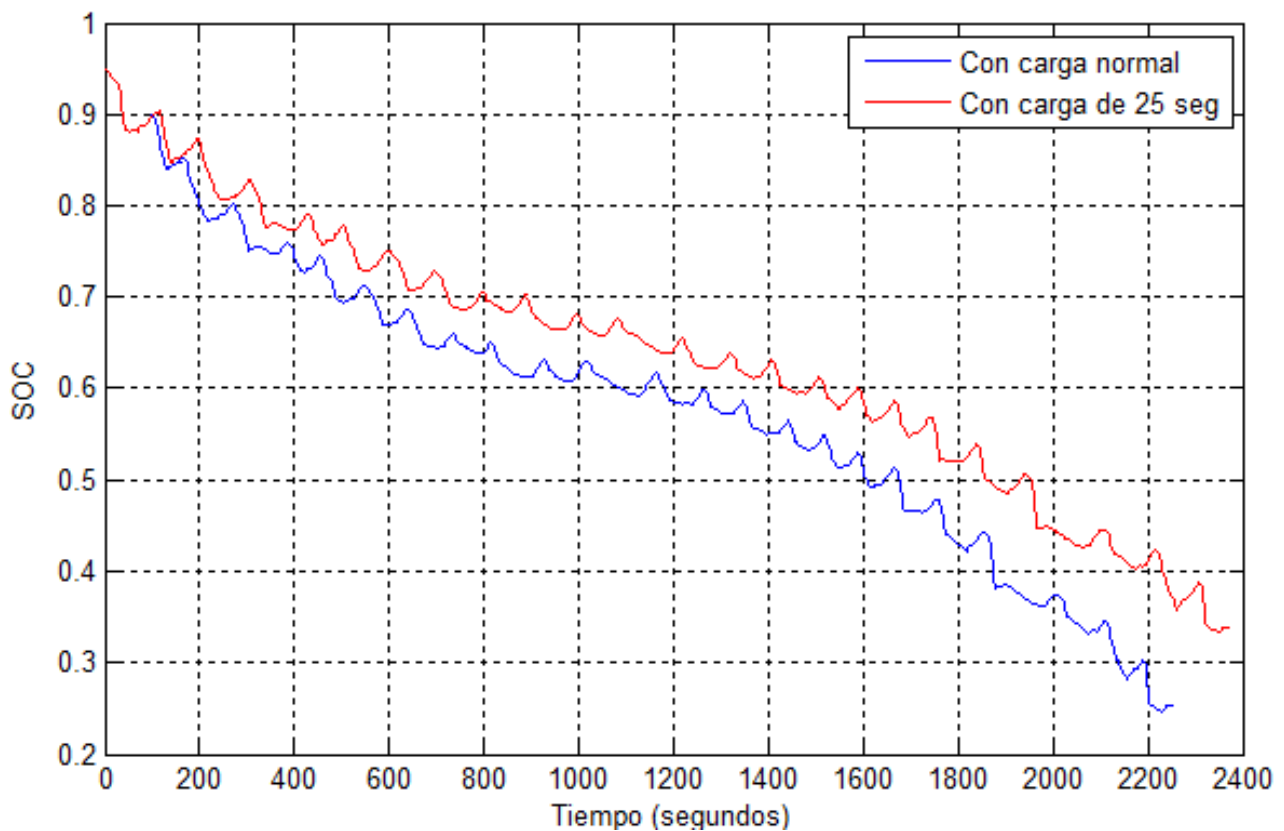


Gráfico 37. Comparación SOC según tiempo de carga de 200 kW en paradas

En el *Gráfico 37* se observa cómo a pesar de haber aumentado el tiempo de carga en paradas de 456 a 575 segundos, al utilizarse una potencia tan baja, el aumento del SOC final no es muy significativo, pasando únicamente del 25,23% al 33,84%.

Consumido	71 kWh (5,6 kWh/km)
Tiempo cargando	575 segundos (25 seg en cada una de las 23 paradas)
Potencia de carga	180 kW (200 kW con 90% de eficiencia)
Porcentaje de capacidad utilizable	70 %

Tabla 29. Datos de carga en paradas de 25 segundos a 200 kW

$$\text{Capacidad batería} = \frac{71 \text{ Kwh}_{\text{consumidos}} - \left(\frac{575 \text{ seg}}{3600 \frac{\text{seg}}{\text{hora}}} * 180 \text{ Kw} \right) \text{ Kwh}_{\text{cargados}}}{0,7} \approx 61 \text{ kWh}$$

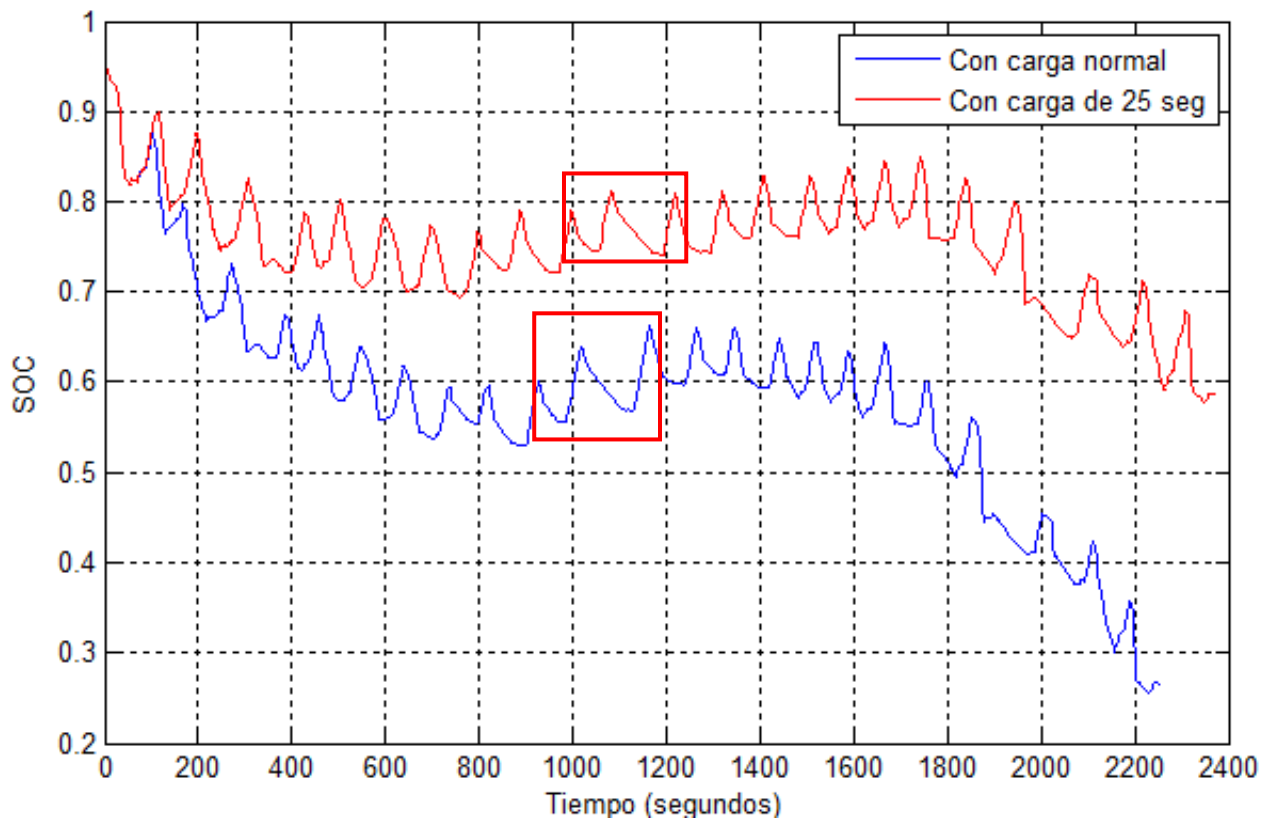
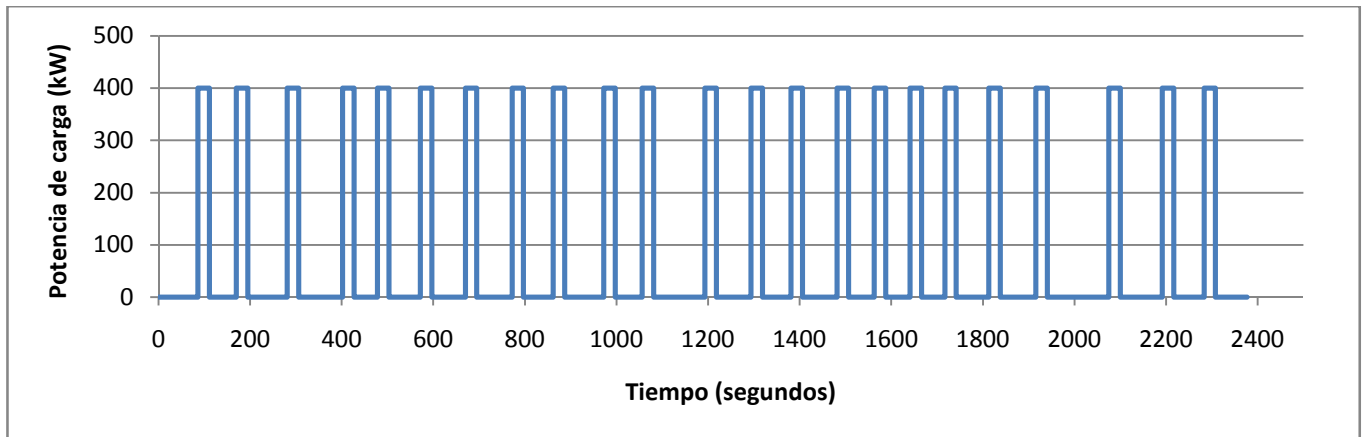
Ecuación 24. Capacidad de batería con carga en paradas de 25 segundos a 200 kW

Aunque el tiempo de carga total ha aumentado casi 2 minutos (de 456 a 575 segundos), solo se han cargado 5,95 kWh más que en el caso de paradas de duración normal hasta un total de 28,75 kWh. Ello hace que la capacidad de la batería solo se haya reducido 8 kWh, hasta los 61 kWh.

$$\text{Tiempo de recarga} = \frac{71 \text{ kWh} - 28,75 \text{ kWh}}{180 \text{ kWh}} \approx 0,234 \text{ horas} = 14 \text{ minutos}$$

Ecuación 25. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas de 25 segundos a 200 kW

Aumentar el tiempo de carga en paradas, no sería suficiente si la carga se realiza a 200 kW ya que 14 minutos sigue siendo demasiado en los momentos en los que el tranvía pasa cada 5 minutos.



En el Gráfico 39 se observa como el descenso del SOC es menor entre cada dos paradas debido a que al permanecer más tiempo detenido las baterías se cargan más. Sin embargo, en algunas como las de "Plaza del Pilar" y "Cesar Augusto" (cuadros rojos del gráfico), el SOC aumenta más en el caso anterior ya que a duración de las paradas era mayor de 30 segundos y ahora lo son de 25.

Consumido	71 kWh (5,6 kWh/km)
Tiempo cargando	575 segundos (25 seg en cada una de las 23 paradas)
Potencia de carga	360 kW (400 kW con 90% de eficiencia)
Porcentaje de capacidad utilizable	70 %

Tabla 30. Datos de carga en paradas de 25 segundos a 400 kW

$$\text{Capacidad batería} = \frac{71 \text{ Kwh}_{\text{consumidos}} - \left(\frac{575 \text{ seg}}{3600 \frac{\text{seg}}{\text{hora}}} * 360 \text{ Kw} \right) \text{ Kwh}_{\text{cargados}}}{0,7} \approx 20 \text{ kWh}$$

Ecuación 26. Capacidad de batería con carga en paradas de 25 segundos a 400 kW

Cuanto mayor es la potencia de carga, mayor es la energía de más que se recarga si se aumenta el tiempo de las paradas. Gracias a ello, se consigue que las baterías necesarias para efectuar todo el trayecto sean de la misma capacidad que las que se necesitaban en el estudio anterior pero cargando a menos potencia (400 kW en lugar de 500).

$$\text{Tiempo de recarga} = \frac{71 \text{ kWh} - 57,5 \text{ kWh}}{360 \text{ kWh}} = 0,0375 \text{ horas} = 2,25 \text{ minutos}$$

Ecuación 27. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas de 25 segundos a 400 kW

De la misma manera que ocurría cuando se cargaba durante el tiempo de parada normal a 500 kW, 2,25 minutos es poco tiempo por lo que no resulta útil sobredimensionar tanto los sistemas de carga.

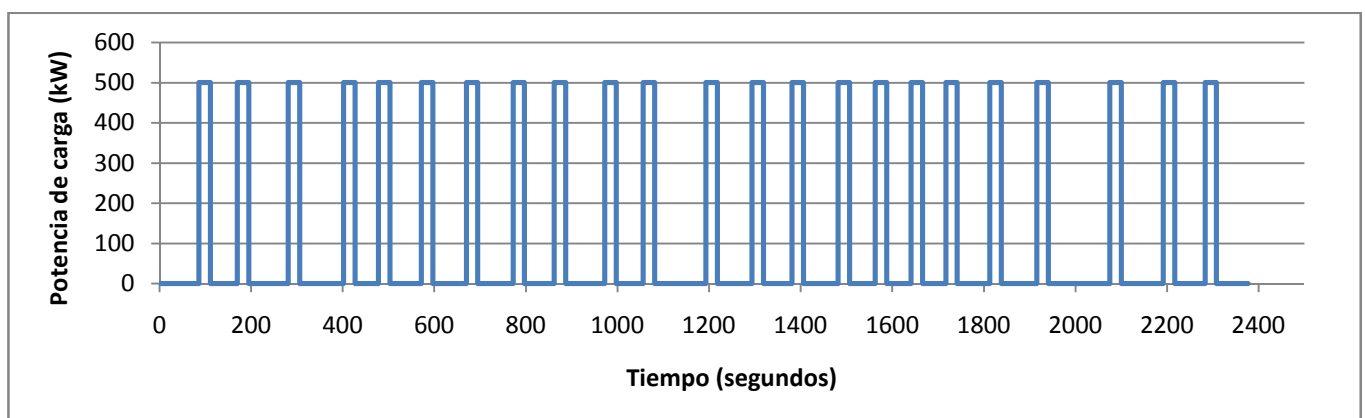


Gráfico 40. Potencia de carga de 500 kW sentido Academia-Valdespartera con tiempo fijo

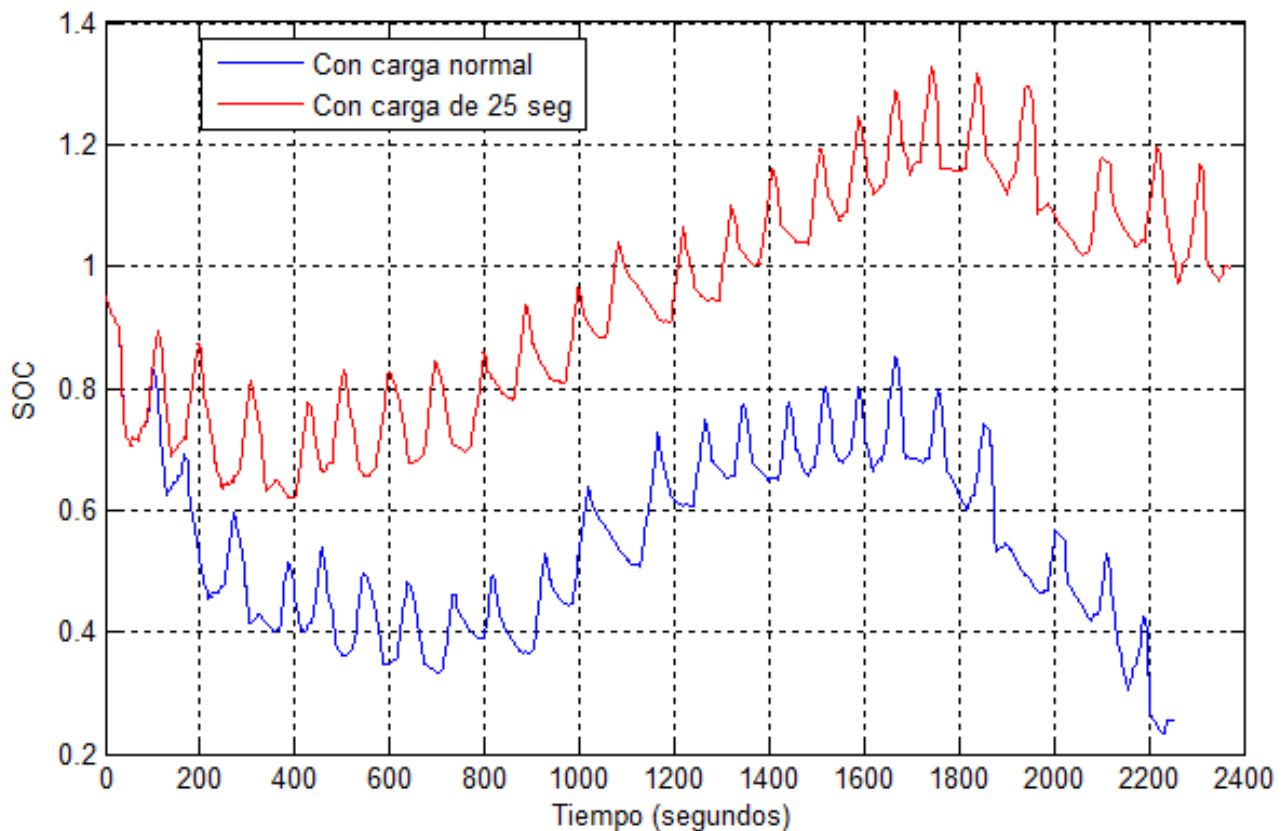


Gráfico 41. Comparación SOC según tiempo de carga de 500 kW en paradas

Consumido	71 kWh (5,6 kWh/km)
Tiempo cargando	575 segundos (25 seg en cada una de las 23 paradas)
Potencia de carga	450 kW (500 kW con 90% de eficiencia)
Porcentaje de capacidad utilizable	70 %

Tabla 31. Datos de carga en paradas de 25 segundos a 500 kW

El modelo de cálculo del SOC, únicamente compara la energía consumida con la de la capacidad de las baterías. Debido a ello, cuando el tiempo de carga y la potencia son muy elevados, como es el caso, se da la situación en la que la energía cargada es muy superior a la consumida, dando un SOC mayor del 100%, lo que es imposible. En este caso para dimensionar las baterías, habrá que estudiar cuál ha sido el mayor consumo. Este ha sido de aproximadamente el 35% de unas baterías de 20 kWh (Gráfico 41). Por lo que las baterías necesarias serán:

$$\text{Capacidad batería} = \frac{0,35 * 20 \text{ kWh}}{0,70} = 10 \text{ kWh}$$

Ecuación 28. Capacidad de batería con carga en paradas de 25 segundos a 500 kW

Al haber cargado en paradas más energía de la consumida, no sería necesario que el tranvía permaneciese tiempo en los extremos, pudiendo funcionar de manera continua empezando inmediatamente el recorrido en el otro sentido. No obstante, el tranvía ha de esperar para cumplir frecuencias por lo que de nuevo, no resulta rentable un sistema de carga tan potente.

Optimización

A continuación se muestran los cálculos para cada potencia una vez se ha optimizado el tiempo de carga en cada una de ellas

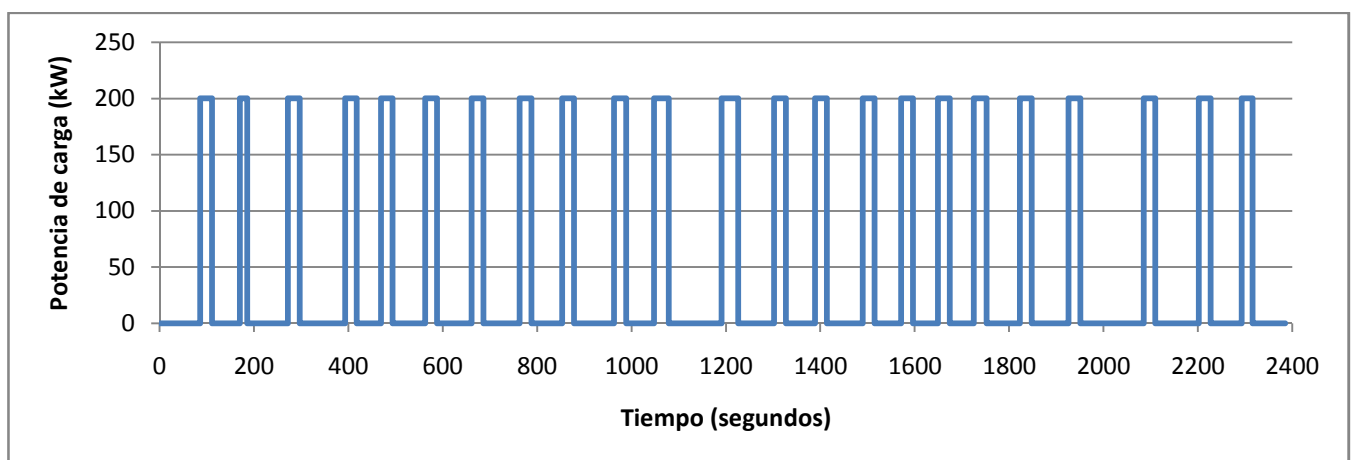


Gráfico 42. Potencia de carga de 200 kW sentido Academia-Valdespartera con tiempo optimizado

Consumido	71 kWh (5,6 kWh/km)
Tiempo cargando	583 segundos
Potencia de carga	180 kW (200 kW con 90% de eficiencia)
Porcentaje de capacidad utilizable	70 %

Tabla 32. Datos de carga de 200 kW en paradas con tiempo optimizado

$$\text{Capacidad batería} = \frac{71 \text{ Kwh}_{\text{consumidos}} - \left(\frac{583 \text{ seg}}{3600 \frac{\text{seg}}{\text{hora}}} * 180 \text{ Kw} \right) \text{ Kwh}_{\text{cargados}}}{0,7} \approx 60 \text{ kWh}$$

Ecuación 29. Capacidad de batería con carga en paradas con tiempo optimizado a 200 kW

El tiempo de carga sólo ha aumentado 8 segundos respecto al estudio anterior (de 575 a 583) por lo que el aumento de energía cargada es sólo de 0,4 kWh. Como consecuencia la capacidad de las baterías que se necesitarían es prácticamente idéntica.

$$\text{Tiempo de recarga} = \frac{71 \text{ kWh} - 29,25 \text{ kWh}}{180 \text{ kW}} \approx 0,23 \text{ horas} = 13,9 \text{ minutos}$$

Ecuación 30. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas con tiempo optimizado a 200 kW

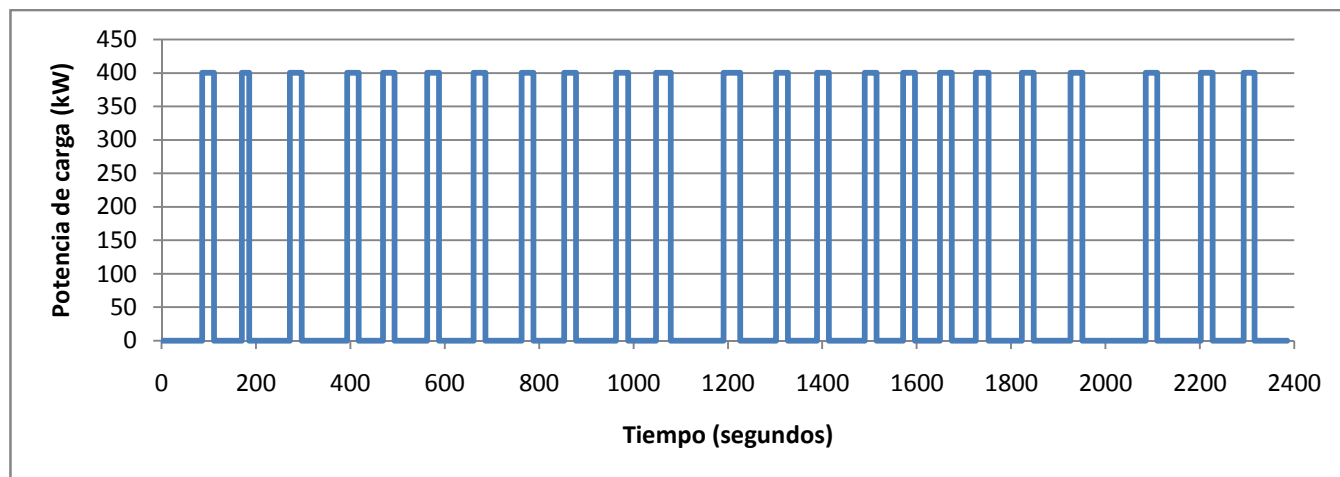


Gráfico 43. Potencia de carga de 400 kW sentido Academia-Valdespartera con tiempo optimizado

Consumido	71 kWh (5,6 kWh/km)
Tiempo cargando	583 segundos
Potencia de carga	360 kW (400 kW con 90% de eficiencia)
Porcentaje de capacidad utilizable	70 %

Tabla 33. Datos de carga de 400 kW en paradas con tiempo optimizado

$$\text{Capacidad batería} = \frac{71 \text{ Kwh}_{\text{consumidos}} - \left(\frac{583 \text{ seg}}{3600 \frac{\text{seg}}{\text{hora}}} * 360 \text{ Kw} \right) \text{ Kwh}_{\text{cargados}}}{0,7} \approx 18.2 \text{ kWh}$$

Ecuación 31. Capacidad de batería con carga en paradas con tiempo optimizado a 400 kW

$$\text{Tiempo de recarga} = \frac{71 \text{ kWh} - 58,3 \text{ kWh}}{360 \text{ kW}} \approx 0,353 \text{ horas} = 2,12 \text{ minutos}$$

Ecuación 32. Tiempo de recarga de baterías con carga en paradas con tiempo optimizado a 400 kW

Tiempos de carga

Los tiempos de carga en segundos en cada parada de cada estudio son los siguientes

Parada	Tiempo normal	Tiempo fijo	Tiempo optimizado
Avenida de la Academia	-	-	-
Parque Goya	15	25	25
Juslibol	6	25	16
Campus Rio Ebro	19	25	25
Margarita Xirgu	18	25	25
Legaz Lacambra	20	25	25
Clara Campoamor	19	25	25
Rosalía de Castro	20	25	25
Martínez Soria	20	25	25
La Chimenea	17	25	25
Plaza Pilar Murallas	26	25	26
Cesar Augusto	31	25	31
Plaza España	35	25	35
Plaza Aragón	23	25	25
Gran Vía	19	25	25
Fernando el Católico	20	25	25
Plaza San Francisco	21	25	25
Plaza Emperador	18	25	25
Romareda	27	25	27
Casablanca	18	25	25
Argualas	19	25	25
Los Olvidados	16	25	25
Los Pájaros	16	25	25
Cantando bajo la lluvia	13	25	23
Mago de Oz	-	-	-
TOTAL	456	575	583

Tabla 34. Tiempos de carga en cada parada de cada estudio

9. Referencias bibliográficas

- [1] Barrero, R., Van Mierlo, J. y Tackoen, X. Enhanced Energy Storage Systems for Improved On-Board Light Rail Vehicle Efficiency. *IEEE Vehicular Technology Magazine*, 2008.
- [2] Bi, Z., Song, L., De Kleine, R., Mi, C. y Keoleian, G. Plug-in vs wireless charging.
- [3] Brecher, A. y Arthur, D. Review and Evaluation of Wireless Power Transfer for Electric Transit Applications. *U.S. Federal Transit Association, Report 0060*, 2014.
- [4] Grunselmann, W. Technologies for Increased Energy Efficiency in Railway Systems. *EPE*, Dresden 2005.
- [5] Ho, D., Jung, G., Yuun, U. y Lee, B. Development and Implementation of Electric Tram System with Wireless Charging Technology. *ICTExpress*. Agosto 2014.
- [6] KAIST On-line Electric Vehicle. Octubre 2013
- [7] Kalwar, K. A., Aamir, M. y Mekhilef, S. Inductively coupled power transfer (ICPT) for electric vehicle charging. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 47. 2015
- [8] Khaligh, A y Li, Z. Battery, Ultracapacitor, Fuel Cell, and Hybrid Energy Storage Systems for Electric, Hybrid Electric, Fuel Cell, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles: State of the Art. *IEEE TRANSACTIONS ON VEHICULAR TECHNOLOGY. VOL 59*. Julio, 2009.
- [9] Lam, L. y Bauer, P. Practical Capacity Fading Model for Li-Ion Battery Cells in Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, 2013.
- [10] Lukic, S. M. Cao, J. Bansal, R. C. Rodriguez, F. y Emadi, A. Energy Storage Systems for Automotive Applications. *IEE TRANSACTIONS OF INDUSTRIAL ELECTRONICS. VOLL 55*. Junio 2008.
- [11] Optimal Design of ICPT Systems Applied for Electric Vehicle Battery Charge
- [12] Ortego, A., Zabalza, I. y Barrio, F. Zaragoza 2020 por la movilidad urbana sostenible. Abril 2015.
- [13] Rawiki, S. Energy Saving Control of Tram Motors Taking Light Signalling and City Disturbances into Account. *International Power Electronics and Motion Control Conference*, 2008.
- [14] Simic, D. y Pucher, E. Saving Potential of HDV Auxiliaries Energy Consumption determined by entire Vehicle Simulation.
- [15] Song, Z., Hofmann, H., Li, J., Han, X. y Ouyang, M. Optimization for a hybrid energy storage system in electric vehicles using dynamic programming approach. *Applied Energy* 139. 2015
- [16] Spizzi, S. Technical feasibility of en-route charging technical report. *Wireless charging for Electric Vehicles*. Diciembre, 2013.
- [17] Steiner, M. y Scholten, J.: Energy Storage en board of railway vehicles. *EPE*, Dresden 2005.
- [18] Streit, L y Drabek, P. Simulation Model of Tram with Energy Storage System.
- [19] Streit, L., Talla, J. y Drabek, P. Stochastic Tram Model Based on Real Traffic Data for Energy Storage System Designing.
- [20] Talla, J., Streit, L., Peroutka, Z. y Drabek, P. Position-Based T-S Fuzzy Power Management for Tram With Energy Storage System. *IEEE transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, 2015.

- [21] Villa, J.L., Sanz, J.F. y Sallán, J. Development of a 50 kW inductive electric vehicle battery charge system. *International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (EVS27)*, Barcelona, 2013.
- [22] Wu, X., Du, J., Hu, C. y Jiang, T. The Influence Factor Analysis of Energy Consumption en All Electric Range of Electric City Bus in China. *International Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium (EVS27)*, Barcelona, 2013.
- [23] <http://www.railway-technical.com/tract-02.shtml>
- [24] <https://en.wikipedia.org/wiki/Tram>
- [25] https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_trams
- [26] <https://www.zaragoza.es/ciudad/bomberos/planemergencia/territorio/climatologia.htm>